知名专家 敬加强 熊友明 杨 志 陈小榆 倾力推荐



FLUENT CFD 工程仿真实战指南

朱红钧 编著

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

DVD
教学光盘

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com



FLUENT为通用的CFD软件包，已在实际工程领域有广泛应用，可以模拟地层、井筒、地面集输管线内的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等流动情况，也可以开展石油工程领域相关工具的基于流场分布的结构优化设计，如节流阀、整流器、旋流器、分离器等。本书特别适合石油工程、机械工程、流体力学领域的从业人员、科技工作者及在校学生使用。

——敬加强

教授/博导、油气储运工程专家

本书以FLUENT 14.5为蓝本，列举利用FLUENT解决工程领域所遇实际问题的思路及过程。书中实例可为核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输等领域研究人员提供参考。本书可作为FLUENT自学者提高与进阶的学习宝典，也可作为高等院校教育、培训机构的专业教材。

——熊友明

教授/博导、海洋油气工程专家

本书依次介绍了计算流体力学基础、FLUENT 14.5简介、模拟计算前处理、模拟计算后处理、钻井工程中的应用、采油气工程中的应用、油气田地面工程中的应用、海洋油气工程中的应用，涵盖了FLUENT基本原理、计算前后处理软件、FLUENT自身功能介绍，以及石油工业钻、采、输三大工程及海洋油气工程这一新兴领域，适合相关行业人员和在校学生使用。

——杨志

副教授/硕导、海洋油气工程专家

本书把握住了CFD的研究方向，重点介绍了FLUENT软件在工程领域的应用，配备了实例源文件及视频教学文件，犹如面临授课，能够使读者较快地学会并使用FLUENT软件解决实际问题，本书是CFD工程应用领域很好的一本参考资料。

——陈小榆

副教授/硕导、流体力学专家

ISBN 978-7-115-36377-0
9 787115 363770 >
封面设计：
分类建议：计算机/工程软件/FLUENT
人民邮电出版社网址：www. ptpress. com. cn
ISBN 978-7-115-36377-0
定价：59.00 元（附光盘）

FLUENT CFD 工程仿真实战指南

朱红钧 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目（CIP）数据

FLUENT CFD工程仿真实战指南 / 朱红钧编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2014.9
ISBN 978-7-115-36377-0

Ⅰ. ①F… Ⅱ. ①朱… Ⅲ. ①流体力学－工程力学－计算机仿真－应用软件－指南 Ⅳ. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第174536号

内 容 提 要

FLUENT 为通用的 CFD 软件包，已在石油工程领域有广泛应用，可以模拟地层、井筒及地面集输管线内的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等的流动情况，也可以开展石油工程领域相关工具的基于流场分布的结构优化设计，如节流阀、整流器、旋流器、分离器等。本书将以 FLUENT 14.5 为蓝本，列举利用 FLUENT 解决石油工程领域所遇实际问题的思路及过程。全书以“功能讲解+思路分析+应用过程+视频讲解”的方式，通过大量实例全面介绍 FLUENT 在石油工程中的应用。

本书可作为核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输等领域研究人员的参考书，也可作为 FLUENT 14.5 自学者提高与进阶的学习宝典，还可作为各大院校教育、培训机构的专业教材。

◆ 编　　著　朱红钧
　责任编辑　李永涛
　责任印制　杨林杰
◆ 人民邮电出版社出版发行　　北京市丰台区成寿寺路 11 号
　邮编　100164　　电子邮件　315@ptpress.com.cn
　网址　http://www.ptpress.com.cn
　北京鑫正大印刷有限公司印刷
◆ 开本：787×1092　1/16
　印张：22.75
　字数：554 千字　　　　2014 年 9 月第 1 版
　印数：1-3 000 册　　　2014 年 9 月北京第 1 次印刷

定价：59.00 元（附光盘）

读者服务热线：(010)81055410　印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315
广告经营许可证：京崇工商广字第 0021 号

序

CFD 软件能够开展传热、传质及燃烧、多相流和化学反应等数值仿真，覆盖管道设计、海工管道设计、航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体设计等诸多工程领域。由于理论分析和实验方法存在一定的限制，因此 CFD 技术在最近 20 年得到了飞速的发展。随着当今世界对能源需求的逐渐增加，对各种资源特别是石油天然气资源的有效利用及开发就显得至关重要，但物理实验研究的局限性使得该方向的发展缓慢；此外，随着安全意识的提高，管柱、集输管道与流体机械的设计及运用的要求越来越高，而利用 CFD 技术设计管道及机械或者利用 CFD 方法进行模拟，不仅可以发挥其成本低且安全有效的优点，并且可以模拟较复杂或较危险的过程。

CFD 软件可以拓宽实验研究的范围，减少成本昂贵的实验工作量。在给定的参数下，用计算机对现象进行一次数值模拟，相当于进行一次数值实验。并且 CFD 软件之间可以方便地进行数值交换，并采用统一的前、后处理工具，这就省却了科研工作者在计算机方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动，而将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。

FLUENT 软件设计基于“CFD 计算机软件群的概念”，针对每一种流动问题的特点，采用适合于它的数值解法，在计算速度、稳定性和精度等方面达到优化。FLUENT 是目前相对成熟且使用广泛的商用流体分析软件，已在石油工程领域有广泛应用，可以模拟地层、井筒、地面集输管线内的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等的流动情况，也可以开展石油工程领域相关工具的基于流场分布的结构优化设计。本书的立意主要集中 FLUENT 软件在石油工程领域运用中所遇到的前沿问题的解决方法，针对石油钻井工程、采油工程、油气田地面工程、海洋油气工程、石油机械工程、石油井下工具设备等石油工程各子领域面临的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等流动问题，进行数值仿真计算的详细介绍。本书必将是工程运用及研究教学很好的参考资料，尤其适用于石油工程领域的行业人员、科技工作者及在校学生。

本书通过对 FLUENT 14.5 软件的运用，列举利用 FLUENT 解决石油工程领域所遇实际问题的思路及过程。全书共分为 8 章，依次介绍了计算流体力学基础、FLUENT 14.5 简介、模拟计算前处理、模拟计算后处理、钻井工程中的应用、采油气工程中的应用、油气田地面工程中的应用、海洋油气工程中的应用，涵盖了 FLUENT 基本原理，计算前后处理软件，FLUENT 自身功能介绍，以及石油工业钻、采、输三大工程，海洋油气工程这一新兴领域。其中，书中配备的实例文件及视频教学文件，能够较大限度地帮助读者学会并熟悉 FLUENT 的操作流程，掌握 FLUENT 的相关模型去解决实际工程问题。

谨祝本书能够帮助你在 CFD 工程仿真领域有深入的拓展！

赵振兴

流体力学教授

2014 年 6 月于南京

关于本书

能源需求局势的日趋紧张，必然伴随着石油、天然气资源的有效利用及开发，而物理实验研究的局限性使得该方向的发展缓慢；此外，随着安全意识的提高，管柱、集输管道与流体机械的设计及运用的要求越来越高，而利用 CFD 技术设计管道及机械是成本低且安全有效的方法。因此，该领域急需大量的流体数值分析人才。

FLUENT 是目前相对成熟且使用广泛的商用流体分析软件。石油工业领域已开始运用 CFD 技术解决相关工程的实际问题，但国内外至今还没有统一的教材及参考资料，摸索过程费时费力，且得不到理想的计算结果。本书的立意主要集中在 CFD 软件（FLUENT）在石油工程领域运用中所遇到的前沿问题的解决方法，针对石油钻井工程、采油工程、油气田地面工程、海洋油气工程、石油机械工程、石油井下工具设备等石油工程各子领域面临的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等流动问题，进行数值仿真计算的详细介绍。本书必将是工程运用及研究教学很好的参考资料，尤其适用于石油工程领域的行业人员、科技工作者及在校学生。

内容和特点

本书以 FLUENT 14.5 为蓝本，列举 CFD 技术在石油工程领域所遇实际问题的解决思路及运用过程，涵盖了 FLUENT 基本原理，计算前后处理软件，FLUENT 自身功能介绍，以及石油工业钻、采、输三大工程，海洋油气工程这一新兴领域。

全书分为 8 章，主要内容介绍如下。

- 第 1 章：计算流体力学基础。
- 第 2 章：FLUENT 14.5 简介。
- 第 3 章：模拟计算前处理。
- 第 4 章：模拟计算后处理。
- 第 5 章：钻井工程中的应用。
- 第 6 章：采油气工程中的应用。
- 第 7 章：油气田地面工程中的应用。
- 第 8 章：海洋油气工程中的应用。

本书在编写过程中突出了以下特点。

- 全书以图解实例的形式介绍典型实例操作，直观易懂，使用户能够在最短的时间内获取知识。
- 全书采用了操作界面及功能介绍和实例操作相结合的方法，互相补充，书本上的实例大多来源于生产实例，并且从用户的角度出发进行了简化和改进，同时在各内容关键处给予了有益的提示和指导，使用户在学完本书后能够快速地将知识应用于生产实践。
- 全书采用“功能、实例、视频”循序渐进的讲解方法，一步步提高用户的 FLUENT 流体分析能力，而且每个知识点和实例都做了尽可能详细的讲解，使用户学习起来轻松自如。

- 全书录制视频，将功能讲解、实例讲解等全部内容，按照上课教学的形式录制成多媒体视频，让读者如临教室，学习效果更好。

读者对象

本书可作为核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输等领域研究人员的参考书，也可作为 FLUENT 14.5 自学者提高与进阶的学习宝典，还可作为各大院校教育、培训机构的专业教材。

附盘内容及用法

本书配有 1 张多媒体 DVD，其主要内容和使用注意事项介绍如下。

1. 本书是基于 FLUENT 14.5 版本进行写作的，读者需要以不低于上述版本的软件打开文件。
2. 由于光盘是只读文件，因此，需要将光盘上的源文件复制到计算机硬盘上，并取消文件的“只读”属性，导入方能进行修改。
3. START 文件夹用于存放操作实例的起始文件，对应文中的起始文件。END 文件夹用于存放操作实例的结果文件，对应文中的结果文件。AVI 文件夹用于存放所有操作实例的操作录像，对应文中的动画演示，直接双击需要播放的文件即可观看。
4. Ch*文件夹的*号代表某个数字，与本书的章对应，其中的文件是该章中使用到的相关文件，包括本书中所有操作实例的起始文件、结果文件和视频文件。

注意：播放文件前要安装配套光盘根目录下的“tscc.exe”插件。

全书由西南石油大学朱红钧编著。另外，西南石油大学 CNPC“石油管工程”重点实验室的研究生冯光、戚兴、韩青华、马粤和赵洪南参与了部分模拟操作和文档整理工作。本书还得到了人民邮电出版社的大力支持。在此一并致以深深的谢意。同时也非常感谢 SimWe 仿真科技论坛、工程流体网论坛、流体论坛广大网友的帮助和支持。

限于编者水平，且时间仓促，书中难免有疏漏之处，望广大读者给予指正。也期待读者通过电子邮件（swputicky@126.com）与我们交流！

朱红钧

2014 年 6 月于成都

目 录

第 1 章 计算流体力学基础 1

1.1 流体力学基本理论 1

1.1.1 流体的物理性质 1

1.1.2 流体的分类 4

1.1.3 作用于流体上的力 5

1.2 CFD 基本方程 6

1.2.1 流体力学的连续性方程 6

1.2.2 流体力学的动量方程 6

1.2.3 流体力学的能量方程 8

1.2.4 湍流模型 8

1.2.5 气体状态方程 14

1.2.6 初始条件与边界条件 15

1.3 流体分析的发展 17

1.3.1 CFD 的提出 17

1.3.2 通用 CFD 软件现状 17

1.3.3 CFD 数值计算过程 19

1.3.4 CFD 应用领域 20

1.4 小结 21

第 2 章 FLUENT 14.5 简介 22

2.1 FLUENT 14.5 软件特性 22

2.1.1 FLUENT 软件特性 22

2.1.2 FLUENT 14.5 的新特性 23

2.2 FLUENT 14.5 的操作界面 28

2.2.1 FLUENT 14.5 的打开 28

2.2.2 FLUENT 14.5 图形界面 28

2.2.3 FLUENT 14.5 文本界面 32

2.3 FLUENT 14.5 基本操作 32

2.3.1 图形控制及鼠标使用 32

2.3.2 网格读入 33

2.3.3 模型设置 34

2.3.4 材料属性设置 35

2.3.5 计算域材料选择 35

2.3.6 流体相设置 36

2.3.7 边界条件设置 36

2.3.8 参考值设置 36

2.3.9 算法设置 37
2.3.10 监视参数设置 37
2.3.11 计算初始化设置 38
2.3.12 迭代计算设置 38
2.3.13 结果查看 39
2.3.14 结果保存 39
2.4 FLUENT 14.5 模型 40
2.4.1 湍流模型 40
2.4.2 传热模型 40
2.4.3 多相流模型 41
2.4.4 离散相模型 42
2.4.5 组分输运与化学反应模型 42
2.4.6 凝固与融化模型 43
2.4.7 声学模型 43
2.4.8 动网格模型 44
2.4.9 UDF 的使用 45
2.5 FLUENT 14.5 基础实例演示 46
2.5.1 案例简介与思路分析 46
2.5.2 几何建模 47
2.5.3 网格划分 47
2.5.4 FLUENT 中的求解设置 49
2.5.5 结果后处理与分析 53
2.6 小结 54

第 3 章 模拟计算前处理 55

3.1 Gambit 2.4.6 的应用 55
3.1.1 Gambit 2.4.6 基本界面 55
3.1.2 Gambit 2.4.6 几何建模 57
3.1.3 Gambit 2.4.6 网格划分 60
3.1.4 Gambit 2.4.6 基础实例演示 63
3.2 ICEM CFD 14.5 的应用 68
3.2.1 ICEM CFD 14.5 基本界面 68
3.2.2 ICEM CFD 14.5 几何建模 70
3.2.3 ICEM CFD 14.5 网格划分 70
3.2.4 ICEM CFD 14.5 基础实例演示 72
3.3 小结 75

第 4 章 模拟计算后处理 76

4.1 FLUENT 内置后处理 76

目录

4.1.1 图形显示......76
4.1.2 曲线绘制......80
4.1.3 报告分析......81
4.1.4 数据输出......82
4.2 Tecplot 后处理......83
4.2.1 数据输入......83
4.2.2 图形显示......84
4.3 CFD-Post 通用后处理......89
4.3.1 图形绘制......90
4.3.2 曲线绘制......91
4.3.3 报告制作......92
4.4 小结......92
第 5 章 钻井工程中的应用......93
5.1 概述......93
5.2 空气钻井环空气固两相流动模拟......96
5.2.1 案例简介与思路分析......96
5.2.2 几何建模......97
5.2.3 网格划分......99
5.2.4 FLUENT 中的求解设置......100
5.2.5 结果后处理与分析......108
5.3 气侵过程环空气液两相流动模拟......110
5.3.1 案例简介与思路分析......110
5.3.2 几何建模......112
5.3.3 网格划分......114
5.3.4 FLUENT 中的求解设置......116
5.3.5 结果后处理与分析......122
5.4 井底喷嘴射流分析......123
5.4.1 案例简介与思路分析......123
5.4.2 几何建模......125
5.4.3 网格划分......128
5.4.4 FLUENT 中的求解设置......131
5.4.5 结果后处理与分析......135
5.5 泡沫冲砂洗井模拟......138
5.5.1 案例简介与思路分析......138
5.5.2 几何建模......140
5.5.3 网格划分......143
5.5.4 FLUENT 中的求解设置......145
5.5.5 结果后处理与分析......150

5.6 小结......152

第6章 采油气工程中的应用......153

6.1 概述......153
6.2 井下节流流场与温度场模拟......155
6.2.1 案例简介与思路分析......155
6.2.2 几何建模......156
6.2.3 网格划分......157
6.2.4 FLUENT 中的求解设置......158
6.2.5 结果后处理与分析......162
6.3 文丘里管内原油流动分析......163
6.3.1 案例简介与思路分析......163
6.3.2 几何建模......165
6.3.3 网格划分......168
6.3.4 FLUENT 中的求解设置......169
6.3.5 结果后处理与分析......171
6.4 T 型管内天然气流动分析......172
6.4.1 案例简介与思路分析......172
6.4.2 几何建模......173
6.4.3 网格划分......176
6.4.4 FLUENT 中的求解设置......178
6.4.5 结果后处理与分析......180
6.5 上升管内油气两相流动模拟......180
6.5.1 案例简介与思路分析......180
6.5.2 几何建模......181
6.5.3 网格划分......182
6.5.4 FLUENT 中的求解设置......183
6.5.5 结果后处理与分析......186
6.6 井口采油树油流流场模拟......187
6.6.1 案例简介与思路分析......187
6.6.2 几何建模......188
6.6.3 网格划分......189
6.6.4 FLUENT 中的求解设置......192
6.6.5 结果后处理与分析......196
6.7 油管接头 J 型区涡流场模拟......199
6.7.1 案例简介与思路分析......199
6.7.2 几何建模......200
6.7.3 网格划分......201
6.7.4 FLUENT 中的求解设置......202

6.7.5 结果后处理与分析 209
6.8 小结 212

第7章 油气田地面工程中的应用 213
7.1 概述 214
7.2 突变管内油水两相流动分析 216
7.2.1 案例简介与思路分析 216
7.2.2 几何建模 217
7.2.3 网格划分 217
7.2.4 FLUENT 中的求解设置 218
7.2.5 结果后处理与分析 222
7.3 弯管内油水两相流动分析 223
7.3.1 案例简介与思路分析 223
7.3.2 几何建模 224
7.3.3 网格划分 227
7.3.4 FLUENT 中的求解设置 229
7.3.5 结果后处理与分析 232
7.4 节流阀内油品流动分析 233
7.4.1 案例简介与思路分析 233
7.4.2 几何建模 234
7.4.3 网格划分 235
7.4.4 FLUENT 中的求解设置 236
7.4.5 结果后处理与分析 239
7.5 输气管道泄漏扩散分析 240
7.5.1 案例简介与思路分析 240
7.5.2 几何建模 242
7.5.3 网格划分 242
7.5.4 FLUENT 中的求解设置 243
7.5.5 结果后处理与分析 247
7.6 热油管道温降分析 248
7.6.1 案例简介与思路分析 248
7.6.2 几何建模 249
7.6.3 网格划分 251
7.6.4 FLUENT 中的求解设置 253
7.6.5 结果后处理与分析 259
7.7 油水分离器仿真模拟 260
7.7.1 案例简介与思路分析 260
7.7.2 几何建模 262
7.7.3 网格划分 268

7.7.4 FLUENT 中的求解设置......268
7.7.5 结果后处理与分析......272
7.8 液固两相流冲刷腐蚀模拟......275
7.8.1 案例简介与思路分析......275
7.8.2 几何建模......276
7.8.3 网格划分......277
7.8.4 FLUENT 中的求解设置......278
7.8.5 结果后处理与分析......282
7.9 甲烷燃烧器模拟......283
7.9.1 案例简介与思路分析......284
7.9.2 几何建模......284
7.9.3 网格划分......285
7.9.4 FLUENT 中的求解设置......286
7.9.5 结果后处理与分析......291
7.10 小结......292

第 8 章 海洋油气工程中的应用......293

8.1 概述......293
8.2 海洋平台桩基冲刷分析......295
8.2.1 案例简介与思路分析......295
8.2.2 几何建模......296
8.2.3 网格划分......298
8.2.4 FLUENT 中的求解设置......300
8.2.5 结果后处理与分析......305
8.3 海洋立管绕流分析......307
8.3.1 案例简介与思路分析......307
8.3.2 几何建模......308
8.3.3 网格划分......309
8.3.4 FLUENT 中的求解设置......310
8.3.5 结果后处理与分析......313
8.4 二维数值造波......314
8.4.1 案例简介与思路分析......314
8.4.2 几何建模......315
8.4.3 网格划分......316
8.4.4 FLUENT 中的求解设置......317
8.4.5 结果后处理与分析......324
8.5 平台储罐天然气泄漏扩散模拟......327
8.5.1 案例简介与思路分析......327
8.5.2 几何建模......329

8.5.3 网格划分 331
8.5.4 FLUENT 中的求解设置 332
8.5.5 结果后处理与分析 339
8.6 水力旋流器油水分离模拟 340
8.6.1 案例简介与思路分析 341
8.6.2 几何建模 342
8.6.3 网格划分 344
8.6.4 FLUENT 中的求解设置 346
8.6.5 结果后处理与分析 349
8.7 小结 351

第1章 计算流体力学基础

流体力学和其他学科一样，最早主要通过理论分析和实验研究两种手段得以不断发展。理论分析是依据数学方法来求解问题的解析解，但能用这种方法求出结果的问题毕竟是少数。实验研究主要是进行原型或模型的参数监测，通过有限的点数据来反映流体的流动情况。然而，实验总会存在误差，得到的数据不能覆盖全局。随着计算机仿真技术的高速发展，计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）作为流体力学的一个分支应运而生。它以高性能计算机为工作平台，依据科学的数值算法对流体力学的控制方程进行迭代求解，旨在得到计算域中流场各参数的全局分布情况。计算流体力学在近二十年得到了飞速的发展，弥补了原先理论分析的不足，替代了高风险、高成本的实验研究，实现了流体力学发展质的改变。本章将对计算流体力学基础做一个全面的介绍，帮助读者在学习软件之前掌握其内在的基本理论。

本章内容

- 流体力学基本理论。
- CFD 基本方程。
- 流体分析的发展。

1.1 流体力学基本理论

流体是指在任何微小切应力作用下都会发生连续不断变形的物质，这种连续不断的变形称为流动。流体与固体的区别在于，当施加一定外力时，固体也要发生变形，但变形量达到一定程度时，其内部的变形抗力就会阻止固体继续变形，因此，固体能承受压力、拉力、切力，不呈现流动性，而流体不能在承受剪切应力的同时使自己保持静止的状态。

流体力学是以流体为研究对象，研究其平衡、运动时宏观物理量（具有大量流体分子统计平均特性）的变化规律，及流体与固体之间相互作用的力学特点的一门学科。计算流体力学即是利用数值计算方法来完成流体力学的研究任务，属于流体力学的分支。在利用计算流体力学方法进行流体流动的数值仿真之前，应首先了解流体力学相关的基本理论。

1.1.1 流体的物理性质

流体具有惯性、压缩性、膨胀性、黏性和表面张力特性等物理性质，其中黏性是其区别于固体的一个重要的物理性质。

一、惯性

惯性是物质保持原有运动状态的特性，即使流体在不受外力作用时，也具有保持原有运动状态的属性。质量是流体惯性大小的量度，质量越大，惯性越大。单位体积流体所具有的质量称为密度，表达式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-1}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；m 为流体质量，kg；V 为流体体积，m^3。

二、压缩性

流体的压缩性是指温度不变的条件下，流体体积和密度随所受压力的变化而变化的性质。可用体积压缩率来度量压缩性的大小，即压强增大一个单位值时，流体体积相应地减小一个单位值（见图 1-1），表达式如下

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \tag{1-2}$$

式中，β 为体积压缩率，Pa^{-1}；p 为所受的外部压强，Pa。

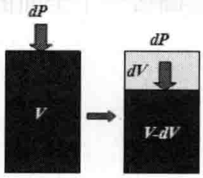


图1-1　压缩过程

三、膨胀性

流体的膨胀性为压强不变时，体积随温度而变化的性质。与压缩性类似，用温度变化 1K 时体积的相对变化来表示膨胀性的大小（见图 1-2），有

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} \tag{1-3}$$

式中，α_v 为体积膨胀系数，K^{-1}；T 为流体温度，K。

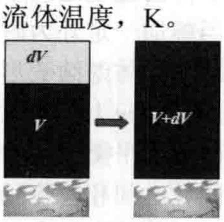


图1-2　膨胀过程

四、黏性

黏性是流体区别于固体的一个重要性质，它是指流体在运动状态下具有抵抗剪切变形的能力，体现为流体流动时，流体层内部出现内摩擦力，阻碍质点做相对运动。此内摩擦力又称为切应力，其大小可由牛顿内摩擦定律计算得出

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-4}$$

式中，τ 为切应力，Pa；μ 为流体动力黏度，Pa·s；du/dy 为速度梯度，s^{-1}。

表征流体黏性的物理量称为黏度，分为动力黏度 μ 与运动黏度 υ 两种，它们的表达式如下

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \tag{1-5}$$

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-6}$$

式中，υ 为运动黏度，m^2/s。

注意：FLUENT 材料定义里面默认的黏度为动力黏度，单位为 kg/(m·s)，与 Pa·s 等价，可利用单位换算得到。

流体黏性的本质是由流动流体的内聚力和分子动量交换引起的。一般在相同条件下，液体的黏度要大于气体的黏度，并随着温度和压强的变化而变化。随着温度的升高，所有液体的黏度都减小，而气体的黏度增大。这是由于液体分子间距较小，相互吸引力（即内聚力）较大，黏性主要由内聚力造成。随着温度的升高，分子间距增大，内聚力减小，从而使液体黏度减小。气体分子间距大，内聚力很小，黏性主要是气体分子动量交换的结果。温度升高时，气体分子运动加快，分子的动量交换速率加剧，切应力随之增加，从而造成黏度的增加。

五、表面张力特性

液体表面由于分子引力（分子间的内聚力）不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力，称为表面张力。如自由表面上，气体分子内聚力与液体分子内聚力有显著差别，使液体分子有向内部收缩的倾向，这一性质称为表面张力特性。

细管插入液体时，表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度，这就是由于表面张力作用而导致的毛细现象。当液体与固体壁面接触时，若固体壁面吸附力大于液体内聚力，则液体与固体壁面的接触面有扩大的趋势，称为浸润现象（如水），反之则称为不浸润现象（如水银），如图 1-3 所示。

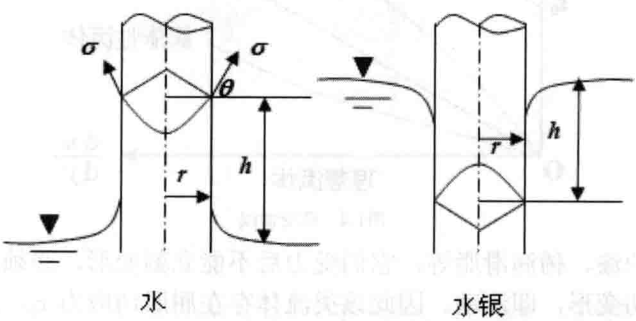


图1-3　浸润与不浸润现象

表面张力很小，一般情况下可以忽略不计，但在液体中模拟气泡运动时需要考虑表面张力的作用。

1.1.2 流体的分类

根据流体的压缩性、黏性等物理性质，可以对流体进行下面三种分类。

一、理想流体与实际流体

根据是否考虑流体的黏性，可以把流体分为理想流体与实际流体两类。在理论研究的初期，学者们通常将流体看作没有黏性（即理想流体）来考虑，大大简化了问题。

注意： FLUENT 进行流体运动仿真时通常需要考虑流体的黏性，即当成实际流体处理，这样的模拟结果更贴近实际。

二、可压缩流体与不可压缩流体

根据流体压缩性的大小，可以将流体分为可压缩流体与不可压缩流体。密度随压强变化较大且不可视为常数的流体，称为可压缩流体；反之，密度随压强变化很小且可视为常数的流体，称为不可压缩流体。

除了水击现象外，一般液流运动均可视为不可压缩流体进行分析计算。低速气体（$v<50\text{m/s}$）也可视为不可压缩流体，这是由于低速气体的压力和温度在整个流动过程中变化很小，它的重度和密度变化也很小，可近似看成常数。而高速气流则需考虑密度变化的影响，作为可压缩流体来处理。

三、牛顿流体与非牛顿流体

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律，可以把流体分为牛顿流体与非牛顿流体。

符合牛顿内摩擦定律，切应力与速度梯度成正比的流体为牛顿流体。切应力与速度梯度不符合线性分布，不满足牛顿内摩擦定律的流体为非牛顿流体。非牛顿流体又可分为塑性流体、假塑性流体与膨胀性流体三种，如图 1-4 所示。

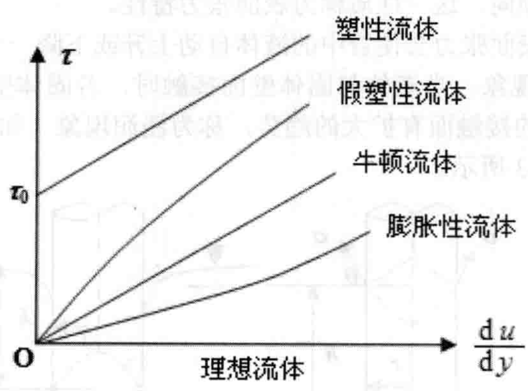


图1-4　流变曲线

塑性流体，如油漆、稀润滑脂等，它们受力后不能立刻变形，必须施加足以破坏其结构性的力才能发生剪切变形，即流动。因此该类流体存在屈服切应力 τ_0，只有克服屈服切应力后才能开始流动。其切应力与速度梯度满足如下关系

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1\text{-}7)$$

式中，τ_0为屈服切应力，Pa。

假塑性流体，如高分子溶液、乳化液等，黏度随速度梯度的增大而减少，其切应力与速度梯度的关系为

$$\tau = k(\frac{du}{dy})^n，n<1 \quad (1\text{-}8)$$

式中，k为稠度系数，取决于流体性质；n为流变指数，无因次。

膨胀性流体，如淀粉糊、石灰浆等，其黏度随速度梯度的增大而增大，其切应力与速度梯度的关系为

$$\tau = k(\frac{du}{dy})^n，n>1 \quad (1\text{-}9)$$

1.1.3 作用于流体上的力

无论是平衡还是运动状态的流体，都受到各种力的作用。作用在流体隔离体上的力，按其表现形式可以分为质量力和表面力两种。

一、质量力

作用在流体每一质点上，且与所作用流体的质量成正比的力为质量力。单位质量流体所受的质量力为单位质量力，它是一个矢量，形式如下

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} = f_x\vec{i} + f_y\vec{j} + f_z\vec{k} \quad (1\text{-}10)$$

式中，下标x、y、z表示X、Y、Z三个方向；f为单位质量力，m/s^2。

最常见的质量力有重力和惯性力两种。重力为

$$G = mg \quad (1\text{-}11)$$

式中，G为重力，N；m为质量，kg；g为重力加速度，m/s^2。若Z轴铅直向上，则单位质量重力的三个分力为$f_x=f_y=0$，$f_z=-g$。

惯性力又分直线惯性力和离心惯性力。直线惯性力为

$$I = -ma \quad (1\text{-}12)$$

式中，I为直线惯性力，N；a为直线加速度，m/s^2。单位质量直线惯性力为$f_x=-a_x$，$f_y=-a_y$，$f_z=-a_z$。

离心惯性力为

$$R = m\omega^2 r \quad (1\text{-}13)$$

式中：R 为离心惯性力，N；ω 为角速度，S^{-1}。若为 XOY 平面的旋转加速运动，其三个方向的单位质量离心惯性力为 $f_x=\omega^2 x$，$f_y=\omega^2 y$，$f_z=\omega^2 z$。

二、表面力

作用在流体表面上，并与受作用流体表面积成正比的力称为表面力。表面力可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力。静止流体只受到压力作用，而单位面积上的压力称为压强。对流体内部的某个点而言，压强大小与方向无关。理想流体运动时只受到压力作用，而实际运动的流体既受到压力作用，又受到切力作用。

通过上述分析可知，流体受质量力和表面力两类力的共同作用。在一般运动中，这些力都有可能存在，但在一些特例中，可能只存在其中几个力。因此，正确分析作用在流体上的力是研究流体平衡和运动规律的基础。

1.2 CFD 基本方程

CFD 是利用数值解算方法求解流体力学的基本控制方程，包括连续性方程、动量方程、能量方程等。

1.2.1 流体力学的连续性方程

连续性方程即质量守恒方程，任何流动问题都必须满足质量守恒定律。按照质量守恒定律，单位时间内流出控制体的流体净质量总和应等于同时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量，由此可导出流体流动连续性方程的微分形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}=0 \tag{1-14}$$

式中，u_x、u_y、u_z 分别为 X、Y、Z 三个方向的速度分量，m/s；t 为时间，s；ρ 为密度，kg/m^3。

若用哈密顿微分算子表示，可以写成散度的形式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+div\left(\rho \vec{u}\right)=0 \tag{1-15}$$

1.2.2 流体力学的动量方程

动量方程的本质是满足牛顿第二定律。该定律可描述为：对于一给定的流体微元体，其动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。依据这一定律，可导出 x、y 和 z 三个方向的动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho u_x \vec{u}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+\rho f_x \tag{1-16 a}$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_y\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}+\rho f_y \tag{1-16 b}$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_z\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}+\rho f_z \tag{1-16 c}$$

式中，p 为流体微元体上的压强，Pa；τ_{xx}、τ_{yy}、τ_{zz} 等是因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量，Pa；f_x、f_y、f_z 为三个方向的单位质量力，m/s^2。

动量方程在实际应用中有许多表达形式，其中比较常见的有如下几种。

(1) 可压缩黏性流体的动量方程。

$$\rho\frac{du_x}{dt}=\rho f_x+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\mu\left[2\frac{\partial u_x}{\partial x}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)\right]\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u_z}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)\right] \tag{1-17 a}$$

$$\rho\frac{du_y}{dt}=\rho f_y+\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\mu\left[2\frac{\partial u_y}{\partial y}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)\right]\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\right] \tag{1-17 b}$$

$$\rho\frac{du_z}{dt}=\rho f_z+\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\mu\left[2\frac{\partial u_z}{\partial z}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)\right]\right\}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u_z}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)\right] \tag{1-17 c}$$

(2) 常黏性流体的动量方程。

$$\rho\frac{d\vec{u}}{dt}=\rho\vec{f}-\mathrm{grad}p+\frac{\mu}{3}\mathrm{grad}(\nabla\cdot\vec{u})+\mu\nabla^2\vec{u} \tag{1-18}$$

(3) 常密度黏性流体的动量守恒方程。

$$\rho\frac{d\vec{u}}{dt}=\rho\vec{f}-\mathrm{grad}p+\mu\nabla^2\vec{u} \tag{1-19}$$

(4) 无黏性流体的动量守恒方程。

$$\rho\frac{d\vec{u}}{dt}=\rho\vec{f}-\text{grad}p \tag{1-20}$$

(5) 静力学方程。

$$\rho\vec{f}=\text{grad}p \tag{1-21}$$

实际流体的连续性方程与动量方程组成的方程组就称为纳维-斯托克斯（N-S）方程。

1.2.3 流体力学的能量方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律，其本质是热力学第一定律。依据能量守恒定律，微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流通量加上质量力与表面力对微元体所做的功，可得其表达式为

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla\cdot\left[\vec{u}(\rho E+p)\right]=\nabla\cdot\left[k_{eff}\nabla T-\sum_j h_j J_j+\left(\tau_{eff}\cdot\vec{u}\right)\right]+S_h \tag{1-22}$$

式中，E 为流体微团的总能，J/kg，包含内能、动能和势能之和，$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}$；$h$ 为焓，J/kg；h_j 为组分 j 的焓，J/kg，定义为 $h_j=\int_{T_{ref}}^{T}C_{p,j}dT$，其中 T_{ref}=298.15K；k_{eff} 为有效热传导系数，W/(m·K)，$k_{eff}=k+k_t$，k_t 为湍流热传导系数，根据所用的湍流模型来确定；J_j 为组分 j 的扩散通量；S_h 为包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项。

1.2.4 湍流模型

雷诺试验表明，当雷诺数（Re）小于某一临界值时，流动是平滑的，流体质点互不混掺，有条不紊地做有序的成层流动，这种流动状态称为层流。当雷诺数大于临界值时，流动呈无序的混乱状态，这种局部速度、压力等物理量在时间和空间中发生不规则脉动的流体流动状态称为湍流。湍流中的脉动现象对工程设计有直接影响，压力的脉动增大了建筑物上承受风载的瞬时载荷，有可能引起建筑物的有害振动；对于水轮机而言，脉动压力最大的负波峰则增加了发生空化的可能性。

一般认为，无论湍流运动多么复杂，非稳态的连续性方程和 N-S 方程对于湍流的瞬时运动都仍然适用。在连续性方程和 N-S 方程基础之上，人们不断引入新的算法，逐步发展成了多个湍流模型，主要有三类。

(1) 湍流输运系数模型，即将速度脉动的二阶关联量表示成平均速度梯度与湍流黏性系数的乘积，模型的任务就是给出计算湍流黏性系数的方法。根据建立模型所需要的微分方程的个数，分为零方程模型、单方程模型和双方程模型。

(2) 直接建立湍流应力和其他二阶关联量的输运方程。

(3) 把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，通过求解三维经过修正的 N-S 方程，得到大涡旋的运动特征，而小涡旋运动则采用上述以湍流的统计结构为基础对所有涡进行统计平均的模型。这种模型称为大涡模拟。

FLUENT 提供的湍流模型如图 1-5 所示，实际求解中，应根据具体问题的湍流特点来决定。选择的原则是精度高、省时、简单通用。

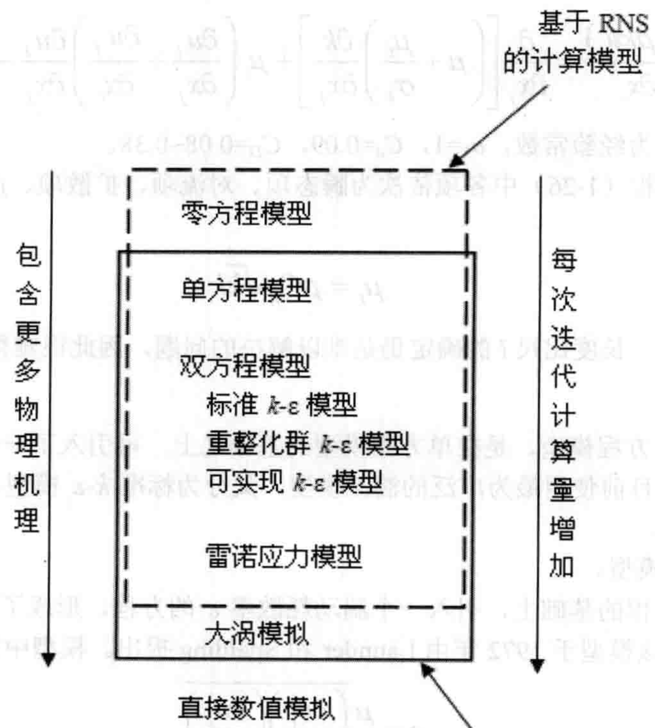


图1-5 湍流模型框图

下面详细介绍几类常用的湍流模型及其控制方程。

一、单方程模型

在介绍单方程（一方程）模型前，首先给出湍流时均的连续性方程与雷诺方程，如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1-23}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)+S_i \tag{1-24}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\phi)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x_j}-\rho\overline{u_j'\phi'}\right)+S \tag{1-25}$$

单方程模型在湍流时均的连续性方程与雷诺方程的基础之上，再建立了一个湍动能 k 的输运方程，将湍动黏度 μ_t 表示成 k 的函数，从而使方程组封闭。湍动能 k 的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho C_D\frac{k^{3/2}}{l} \tag{1-26}$$

式中，σ_k、C_D、C_μ 为经验常数，σ_k=1，C_μ=0.09，C_D=0.08~0.38。

从左至右，方程（1-26）中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项、产生项、耗散项。由普朗特表达式有

$$\mu_t=\rho C_\mu\sqrt{k}l \tag{1-27}$$

单方程模型中，长度比尺 l 的确定仍是难以解决的问题，因此很难得到推广应用。

二、k-ε 模型

k-ε 模型为双方程模型，是在单方程模型的基础之上，再引入了一个关于湍动耗散率 ε 的方程。该模型是目前使用最为广泛的湍流模型，又分为标准 k-ε 模型、重组化群 k-ε 模型和可实现 k-ε 模型。

(1) 标准 k-ε 模型。

在湍动能 k 方程的基础上，引入一个湍动耗散率 ε 的方程，形成了 k-ε 双方程模型，称为标准 k-ε 模型。该模型于 1972 年由 Launder 和 Spalding 提出。模型中的 ε 定义为

$$\varepsilon=\frac{\mu}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)} \tag{1-28}$$

于是，湍动黏度 μ_t 可表示成 k 与 ε 的函数

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1-29}$$

因此，标准 k-ε 模型的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{1-30}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{1-31}$$

其中

$$
\begin{cases}
G_k = \mu_t \left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} \\
G_b = \beta g_i \dfrac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t} \dfrac{\partial T}{\partial x_i} \\
\quad \beta = -\dfrac{1}{\rho} \dfrac{\partial \rho}{\partial T} \\
Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \\
\quad M_t = \sqrt{k / a^2} \\
\quad a = \sqrt{\gamma RT}
\end{cases}
\tag{1-32}
$$

式中，G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$ 为经验常数，FLUENT 中默认值为 $C_{1\varepsilon}$=1.44、$C_{2\varepsilon}$=1.92、$C_{3\varepsilon}$=0.09；σ_k、σ_ε 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数，FLUENT 中默认值为 σ_k=1.0、σ_ε=1.3；Pr_t 为湍动普朗特数，默认取 Pr_t=0.85；g_i 为重力加速度在 i 方向上的分量；β 为热膨胀系数；M_t 为湍动马赫数；a 为声速。

标准 k-ε 模型中，湍动能的输运方程是通过精确方程推导得到的，但耗散率的方程是通过物理推理及数学上模拟相似原形方程得到的。该模型假设流动为完全湍流，分子黏性的影响可以忽略，因此，标准 k-ε 模型只适用于完全湍流的流动过程模拟。

(2) 重整化群 k-ε 模型。

重整化群 k-ε 模型（RNG k-ε 模型）是由 Yakhot 和 Orzag 提出的，它是对瞬时 N-S 方程用重整化群的数学方法推导出来的模型。模型中的常数与标准 k-ε 模型不同，而且方程中也出现了新的函数或项，所得到的湍动能和耗散率方程与标准 k-ε 模型相似，为

$$
\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \tag{1-33}
$$

$$
\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k}\left(G_k + C_{3\varepsilon} G_b \right) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \tag{1-34}
$$

其中

$$
\begin{cases}
\mu_{eff} = \mu + \mu_t \\
\mu_t = \rho C_\mu \dfrac{k^2}{\varepsilon}
\end{cases}
\tag{1-35}
$$

式中，G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响，这些参数与标准 k-ε 模型中的参数相同；α_k、α_ε 分别为湍动能和耗散率的有效普朗特数的倒数；对于高雷诺数问题，C_μ=0.0845。

重整化群 k-ε 模型主要针对的是高雷诺数流动问题，对于低雷诺数问题，则需要进行相应的设置。

(3) 可实现 k-ε 模型。

标准 k-ε 模型在时均应变率特别大的情形下，有可能导致负的正应力。为使流动符合湍流的物理定律，需要对正应力进行某种数学约束。可实现 k-ε 模型（Realizable k-ε 模型）正是基于此提出的，其湍动能及耗散率输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{1-36}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 E\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{1-37}$$

其中

$$\begin{cases} C_1=\max\left(0.43,\dfrac{\eta}{\eta+5}\right),\quad \eta=\left(2E_{ij}\cdot E_{ij}\right)^{1/2}\dfrac{k}{\varepsilon},\quad E_{ij}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \\ \mu_t=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon},\quad C_\mu=\dfrac{1}{A_0+A_S U^* k/\varepsilon},\quad A_S=\sqrt{6}\cos\phi, \\ \phi=\dfrac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right),\quad W=\dfrac{E_{ij}E_{jk}E_{kj}}{\left(E_{ij}E_{ij}\right)^{1/2}},\quad U^*=\sqrt{E_{ij}E_{ij}+\widetilde{\Omega}_{ij}\widetilde{\Omega}_{ij}} \\ \widetilde{\Omega}_{ij}=\Omega_{ij}-2\varepsilon_{ijk}\varpi_k,\quad \Omega_{ij}=\overline{\Omega_{ij}}-\varepsilon_{ijk}\varpi_k \end{cases} \tag{1-38}$$

式中，G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、C_2、A_0 为经验常数，FLUENT 中默认值为 $C_{1\varepsilon}$=1.44、$C_{2\varepsilon}$=1.9、$C_{3\varepsilon}$=0.09、C_2=1.9、A_0=4.0；σ_k、σ_ε 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数，FLUENT 中默认值为 σ_k=1.0、σ_ε=1.2。

该模型适合的流动类型比较广泛，包括有旋均匀剪切流、自由流、腔道流动、边界层流动和有分离的流动等。

双方程模型中，无论是标准 k-ε 模型、重整化群 k-ε 模型还是可实现 k-ε 模型，三个模型有类似的形式，即都有湍动能和耗散率的输运方程，区别在于：

- 计算湍流黏性的方法不同；
- 控制湍流扩散的湍流普朗特数不同；
- 耗散率方程中的产生项和 G_k 关系不同。

三、RSM 模型

上述介绍的各种双方程模型都采用各向同性的湍流黏度来计算湍流应力，这些模型很难模拟出旋转流动及流动方向表面曲率变化的影响。为克服这些缺点，有必要直接对雷诺方程中的湍流脉动应力建立微分方程式并进行求解。

RSM 模型（雷诺应力模型）就是求解雷诺应力张量的各个分量的输运方程，具体形式为

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{u_i u_j}\right)+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho U_k\overline{u_i u_j}\right)=-\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\rho\overline{u_i u_j u_k}+\overline{p\left(\delta_{kj}u_i+\delta_{ik}u_j\right)}\right]\\
&+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\mu\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{u_i u_j}\right)-\rho\left(\overline{u_i u_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}+\overline{u_j u_k}\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\right)-\rho\beta\left(g_i\overline{u_j\theta}+g_j\overline{u_i\theta}\right)\\
&+\overline{p\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)}-2\mu\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}}-2\rho\Omega_k\left(\overline{u_j u_m}\varepsilon_{ikm}+\overline{u_i u_m}\varepsilon_{jkm}\right)
\end{aligned}
\tag{1-39}
$$

其中

$$
\begin{cases}
D_{ij}^T=\dfrac{\partial}{\partial x_k}\left(\dfrac{\mu_t}{\sigma_k}\dfrac{\partial\overline{u_i u_j}}{\partial x_k}\right)\\
\mu_t=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}\\
\phi_{ij}=\phi_{ij,1}+\phi_{ij,2}+\phi_{ij}{}^w\\
G_{ij}=\beta\dfrac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\left(g_i\dfrac{\partial T}{\partial x_j}+g_j\dfrac{\partial T}{\partial x_i}\right)\\
\varepsilon_{ij}=\dfrac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho\varepsilon+Y_M\right)
\end{cases}
\tag{1-40}
$$

式中，左边第二项为对流项 C_{ij}；右边第一项为湍流扩散项 $D_{ij}{}^T$；右边第二项为分子扩散项 $D_{ij}{}^L$；右边第三项为应力产生项 P_{ij}；右边第四项为浮力产生项 G_{ij}；右边第五项为压力应变项 Φ_{ij}；右边第六项为耗散项 ε_{ij}；右边第七项为系统旋转产生项 F_{ij}；σ_k 为湍动能对应的普朗特数，σ_k=0.82。

RSM 模型也属于高雷诺数湍流计算模型，在固体壁面附近，由于分子黏性的作用，湍流脉动受到阻尼，雷诺数很小，上述方程不再适用。

四、LES 模型

湍流包含一系列大大小小的涡团，涡的尺度范围相当宽广。为了模拟湍流流动，我们总希望计算网格的尺度小到足以分辨最小涡的运动，然而，就目前的计算机能力而言，能够采用的计算网格的最小尺度仍比最小涡的尺度大许多。由于系统中的动量、质量、能量及其他物理量的输运主要由大尺度涡影响，因此假设流动的几何和边界条件决定了大涡的特性，而流动特性主要在大涡中体现，小涡受几何和边界条件的影响较小，并且各向同性，所以计算时直接求解大涡，这种方法就是 LES 模型（大涡模型）。

LES 模型的控制方程是对 N-S 方程在波数空间或物理空间进行过滤得到的。过滤的过程是去掉比过滤宽度或给定物理宽度小的涡旋，从而得到大涡旋的控制方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+u\frac{\partial \rho \overline{u_i}}{\partial x_i}=0 \tag{1-41}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \overline{u_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \overline{u_i u_j}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(u\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{1-42}$$

式中，τ_{ij} 为亚网格应力，$\tau_{ij}=\rho\overline{u_i u_j}-\rho\overline{u_i}\cdot\overline{u_j}$ 。

1.2.5 气体状态方程

流体包括气体，而气体具有明显的可压缩性，即在流动过程中，其密度是变量，需要充分考虑其压缩性对流动的影响。理想气体完全符合状态方程：

$$\frac{p}{\rho}=RT \tag{1-43}$$

式中，p 为绝对压强，Pa；T 为热力学温度，K；R 为气体常数，对于空气，$R=287\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$。

在常温常压下，实际气体基本符合状态方程，引入压缩因子，状态方程可改写为

$$p=Z\rho RT \tag{1-44}$$

式中，Z 为实际气体的压缩系数。

不同的气体热力学变化过程，其压强与密度的变化关系也不相同。

(1) 等温过程。

等温过程是指热力学系统在恒定温度下发生的各种物理或化学变化过程，其 p/ρ 为常数。在整个等温过程中，系统与其外界处于热平衡状态。如活塞推动气筒对恒温箱内气体缓慢压缩，所做功等于流进容器内使气体温度保持不变的能量。蓄电池在室温下缓慢充电和放电，都可近似为等温过程。

(2) 等压过程。

等压过程又称定压过程，即热力学系统在发生物理或化学变化过程时，其物质系统的压强始终保持恒定，ρRT 为常数。等压过程能量转化特点是系统吸收的热量等于系统内能的增量和系统对外所做功之和，如水蒸汽在锅炉加热器内受热的过程，气缸中的气体在大气压下受热缓慢膨胀的过程等。

(3) 等容过程。

等容过程又称定容过程，即物质系统的体积保持不变的情况下所发生的各种物理或化学变化过程，其 p/T 为常数。由于在等容过程中系统对外界不做功，因此，当系统的温度升高时，将从外界吸收热量，并全部转变为自身内能的增加。

(4) 绝热过程。

绝热过程是指系统与外界无热量交换时的状态变化过程，其 p/ρ^n 为常数。大气层中的许多重要现象都和绝热变化有关。例如，大气层下层温度随高度而递减，主要是由于空气绝

热混合的结果；水蒸汽凝结、云和雨形成的降温作用，主要是由于空气上升时温度下降的结果；晴朗干燥的天气主要是由于空气下沉引起增温变干的结果。上升空气的降温作用和下沉空气的增温作用主要是由于空气的绝热膨胀和绝热压缩的结果。

大气中做垂直运动的气块的状态变化通常接近于绝热过程。气块上升，外界气压逐渐降低，气块体积膨胀做功消耗内能而降温，叫“绝热冷却”；气块下沉，外界气压逐渐加大，气块体积因外力做功被压缩，使其内能增加而升温，叫“绝热增温”。

绝热过程分为可逆过程和不可逆过程（熵增不为零）两种。

(5) 等熵过程。

可逆（熵增为零）的绝热过程是等熵过程，即系统与外界既没有热量交换，也没有能量交换，简称无能耗的绝热过程，其 p/ρ^k 等于常数，k 为卡门系数，对于空气而言，k=1.4。

1.2.6 初始条件与边界条件

初始条件和边界条件是控制方程有确定解的前提，控制方程与相应的初始条件和边界条件构成对一个物理过程完整的数学描述。现有的 CFD 软件都提供了现成的各种类型的边界条件，这里简单介绍一下有关的初始条件和边界条件。

一、初始条件

初始条件是所研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况，顾名思义，就是计算初始时刻给定的参数。如 $t=t_0$ 时各变量的函数分布为

$$u_x = u_x\left(x,y,z,t_0\right) = u_{x0}\left(x,y,z\right) \tag{1-45 a}$$

$$u_y = u_y\left(x,y,z,t_0\right) = u_{y0}\left(x,y,z\right) \tag{1-45 b}$$

$$u_z = u_z\left(x,y,z,t_0\right) = u_{z0}\left(x,y,z\right) \tag{1-45 c}$$

$$p = p\left(x,y,z,t_0\right) = p_0\left(x,y,z\right) \tag{1-45 d}$$

$$\rho = \rho\left(x,y,z,t_0\right) = \rho_0\left(x,y,z\right) \tag{1-45 e}$$

$$T = T\left(x,y,z,t_0\right) = T_0\left(x,y,z\right) \tag{1-45 f}$$

对于非定常问题，必须给定初始条件，而对于定常问题，不需要初始条件。

二、边界条件

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律。对于任何问题，都必须给定边界条件。例如，流体限于固体壁面包裹的空间内流动，不能有穿过固壁的速度分量；在自由液面上，大气压强被认为是常数；在流体与外界无热传导的边界上，流体与边界之间无温差等。

通常，流体边界可分为流固交界面和流流（液液、液气）交接面。

(1) 流固交界面边界条件。

流体在管内流动时的管壁，飞机、船舶在空气及水中运动时的气固或液固交界面，河水在岸边及河床的液固交界面都属于流固交界面。

对于黏性流体，流体将粘附于固体表面，满足无滑移边界条件，即

$$v\big|_F = v\big|_S \tag{1-46}$$

式中，$v\big|_F$ 是流体速度，m/s；$v\big|_S$ 是固体壁面相应点的速度，m/s。

对于理想流体，流体可沿界面滑移，即有速度地切向分量，但不能脱离界面，即

$$v_n\big|_F = v_n\big|_S \tag{1-47}$$

式中，$v_n\big|_F$ 为流体的法向速度分量，m/s；$v_n\big|_S$ 为固体壁面相应点的法向速度分量，m/s。

(2) 液液交界面边界条件。

密度不同的两种液体的交界面，如油水属于液液交界面。此类分界面两侧的液体应满足

$$v_1 = v_2 \tag{1-48 a}$$

$$T_1 = T_2 \tag{1-48 b}$$

$$p_1 = p_2 \tag{1-48 c}$$

$$\mu_1 \frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_1 = \mu_2 \frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_2 \tag{1-48 d}$$

$$k_1 \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_1 = k_2 \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_2 \tag{1-48 e}$$

(3) 液气交界面边界条件。

水与大气的接触面、自由液面即是液气交界面。自由液面的运动学条件为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla F = 0 \tag{1-49}$$

式中，F 代表自由液面上的所有物理变量。

当不考虑表面张力时，自由液面压强应满足

$$p = p_a \tag{1-50}$$

式中，p_a 为大气压强，一个标准大气压为 101.325kPa。

1.3 流体分析的发展

20 世纪 80 年代前，流体分析主要依靠理论分析与实验研究两种手段，然而它们存在明显的不足，理论分析得到的控制方程往往不能直接求解得到解析解，实验研究只能针对风险低、成本小的问题开展，面对高风险（如硫化氢扩散）、高成本（如海洋钻井过程）以及极难开展实验的问题（如火箭升空与卫星发射）则束手无策。CFD 作为流体分析的新技术，在计算机高速发展的当代，如鱼得水，得到了突破性发展，成为现代流体力学分析的主要手段。

1.3.1 CFD 的提出

流动问题的控制方程一般是非线性的，自变量多，计算域几何形状和边界条件复杂，很难求得解析解。实验测量方法又往往受到模型尺寸、外界干扰、测量精度以及人身安全等限制，有时很难得到理想的实验结果。研究者转而寻找一种能够提供满足工程需要的数值解的方法，这种解决流体问题的数值方法就是 CFD 技术。

近 20 年来，计算机硬件技术的发展突飞猛进，为 CFD 的研究提供了基础平台，使得 CFD 数值模拟研究流体问题得以实现。CFD 把原来在时间和空间域上连续的物理量场，用一系列离散点上的变量值的集合来代替，并通过一定的原则和方式建立起反映这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组，得到场变量的近似解（非解析解，又称为数值解）。通过对流动控制方程的离散求解，可以得到计算域中任意位置上的基本物理量的近似值，也可以得到相关物理量在整个计算域中的分布情况，以及这些物理量随时间的变化情况。通过数据可视化技术，CFD 可以将物理量的分布以云图、等值线图、矢量图等形式呈现出来，直观而形象。因此，CFD 以其明显的优势迅速占据了流体分析的市场。

1.3.2 通用 CFD 软件现状

CFD 技术的发展依托于计算机技术与数值计算方法的发展，在高性能计算机硬件平台的支撑下，CFD 通用软件包得以出现并迅速商业化，对 CFD 技术在工程应用中的进一步推广起到了巨大的促进作用。

CFD 软件于 20 世纪 70 年代诞生于美国，但近十年才真正得到较广泛的应用。为了完成 CFD 计算，早期需要用户自己编写计算程序，但由于 CFD 的复杂性及计算机软硬件的多样性，使得用户各自的应用程序往往缺乏通用性，而 CFD 本身又有其鲜明的系统性与规律性，因此比较适合于被制成通用的商用软件。自 1981 年以来，出现了如 PHOENICS、CFX、STAR-CD、FIDAP、FLUENT 等多个商用 CFD 软件，且随着计算机技术的进一步发展，这些商用软件在工程界正发挥着越来越大的作用。

一、PHOENICS

PHOENICS 是世界上第一个投放市场的 CFD 商业软件，可以算是 CFD 商用软件的鼻祖。这一软件中所采用的一些基本算法，如 SIMPLE 方法、混合格式等，正是由该软件创始人 D.B. Spalding 及其合作者 S.V. Patankar 等所提出的，对以后开发的商业软件有较大的

影响。近年来，PHOENICS 软件在功能与方法方面做了较大的改进，包括纳入拼片式多网格及细密网格嵌入技术，同位网格及非结构化网格技术；在湍流模型方面开发了通用的零方程、低 Reynolds k-ε 模型、RNG k-ε 模型等。应用这一软件可计算大量的实际工作问题，其中包括城市污染预测、叶轮中的流动、管道流动等。

二、CFX

该软件采用有限体积法、拼片式块结构化网络，在非正交曲线坐标（适体坐标）系上进行离散，变量的布置采用同位网格方式。对流项的离散格式包括一阶迎风、混合格式、QUICK、CONDIF、MUSCI 及高阶迎风格式。压力与速度的耦合关系采用 SIMPLE 系列算法（SIMPLEC），代数方程求解的方法中包括线性迭代、代数多重网络、ICCG、STONE 强隐方法及块隐式（BIM）。软件可计算不可压缩及可压缩流动、耦合传热问题、多相流、化学反应、气体燃烧等问题。

三、STAR-CD

这一软件名称是英语 Simulation of Turbulent Flow in Arbitrary Region 的缩写，连字符后的 CD 是开发商 Computational Dynamics 的简称。这是基于有限容积法的一个通用软件。在网格生成方面，采用非结构化网格，单元的形态可以有六面体、四面体、三角形截面的棱柱体、金字塔形的锥体及六种形状的其他多面体。应用这一软件可以计算稳态与非稳态流动、牛顿流体及非牛顿流体的流动、多孔介质中的流动、亚音速及超音速流动，并且这一软件在世界汽车工业中的应用十分广泛。

四、FIDAP

这是英语 Fluid Dynamics Analysis Package 的缩写，系于 1983 年由美国 Fluid Dynamics International 公司推出，是世界上第一个使用有限元法（FEM）的 CFD 软件。可以接受如 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。该软件能计算可压缩及不可压缩流、层流与湍流、单相与两相流、牛顿流体及非牛顿流体的流动问题。

五、FLUENT

FLUENT 软件由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出，是继 PHOENICS 软件之后的第二个投放市场的基于有限体积法的软件。它包含结构化网格及非结构化网格两个版本。在结构化网格版本中有适体坐标的前处理软件，同时也可以纳入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEM-CFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。速度与压力耦合采用同位网格上的 SIMPLEC 算法。对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。软件能计算可压缩及不可压缩流动、含有粒子的蒸发、燃烧过程、多组分介质的化学反应过程等问题。

2006 年，FLUENT 软件被 ANSYS 公司收购，作为 ANSYS 旗下的流体分析软件之一，FLUENT 版本编号沿用 ANSYS 主软件版本编号，即 FLUENT 软件从 FLUENT 6.3 直接跨越为 FLUENT 12，至今又经历了 FLUENT 13、FLUENT 14 和 FLUENT 14.5 三次版本升级。在 ANSYS 大家庭下，FLUENT 的功能不断完善，且与 ANSYS 其他软件模块之间建立了数据交换的桥梁，如通过 Workbench 平台实现流固耦合模拟等。因此，FLUENT 逐渐超越其他流体分析软件，成为当下工程应用领域使用最为广泛的商用 CFD 软件。

1.3.3 CFD 数值计算过程

CFD 的求解过程包括了建立几何模型、划分计算网格、设置控制方程与模型、确定边界条件与初始条件、给定求解控制参数、求解离散方程、判断解的收敛性、显示和输出计算结果等步骤，如图 1-6 所示。

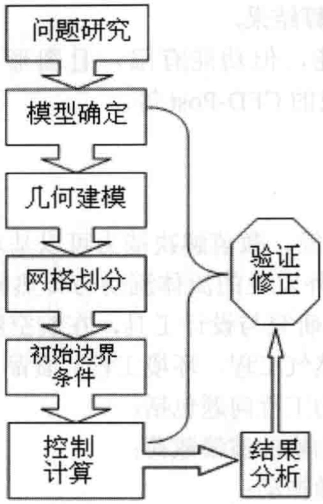


图1-6 CFD 的求解过程

对应 CFD 的数值计算过程，所有商用软件都包含三个基本环节：前处理、解算、后处理，与之对应的程序模块常简称为前处理器、求解器、后处理器。

一、前处理器

前处理环节是向 CFD 软件输入所求问题的相关数据，包括几何模型、网格划分数据、边界类型等。用户需要定义所求问题的几何计算区域，并将计算区域划分成多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格；然后对必要的边界类型进行指定；最后输出对应求解器能识别的网格文件。目前，商用 CFD 软件数值计算时，超过 50%的时间花在几何区域的定义和计算网格的生成上。常用的前处理软件有 Gambit、ICEM CFD、TGrid、ANSYS 自带的 DM 与 meshing 等，当然，我们还可以借助其他 CAD/CAE 软件提供的几何模型。

二、求解器

求解器的核心是数值求解算法。常用的数值求解方案包括有限差分、有限元、谱方法和有限体积法等。总体而言，这些方法的求解过程大致相同，都是首先借助简单函数来近似待求解的流动变量，然后将近似关系代入连续型的控制方程中，形成离散方程组，最后求解代数方程组。各种数值求解方案的主要区别在于流动变量被近似的方式及相应的离散化过程。FLUENT 软件的主体就是一个求解器，用户将网格导入后，可以对所要研究的物理和化学现象进行抽象，选择相应的控制方程，设置相应的模型参数；然后定义具体的边界条件（数值），设置解算方法和参数控制精度；最后初始化计算域，开始解算。

目前，最新版本 FLUENT 14.5 已拥有自主划分网格的能力，因此只需要导入几何模型即可，但其网格划分还相对粗糙，若想得到比较精确的计算结果，还是推荐采用专门的前处

理软件，如 ICEM CFD。

三、后处理器

FLUENT 计算得到的结果需要通过后处理转变成图表的形式输出。后处理器可以帮助用户对流体计算结果进行观察和分析，包括计算区域的几何模型及网格显示、速度矢量图、各物理量的等值线图/云图、XY 散点图、粒子轨迹图等。借助后处理功能，还可以动态模拟流动效果，直观地了解 CFD 的计算结果。

FLUENT 自带有后处理功能，但功能有限，且图形不够精美。常用的后处理器有 Tecplot 和 ANSYS Workbench 集成的 CFD-Post 等。

1.3.4 CFD 应用领域

CFD 软件的功能不断得到开发，数值解决能力可以基本覆盖所有的流体流动问题。对于各种复杂几何形状的空间内、外发生的流体流动与传热问题，都可以有效地进行分析计算。目前，CFD 作为一个主要的研究与设计工具，在航空航天工程、流体机械工程、水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程、海洋工程等领域发挥着重要作用。典型的应用场合及相关的工程问题包括：

(1) 数值造波技术与海洋结构物的波浪载荷；
(2) 海洋隔水管与立管的涡激振动；
(3) 水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动；
(4) 自来水厂与污水处理厂水处理池的设计与给排水管网的布置；
(5) 石油、天然气的地下渗透、钻井、开采及储运过程；
(6) 飞机和航天飞机等飞行器的设计；
(7) 汽车流线外形对性能的影响；
(8) 洪水波及河口潮流计算；
(9) 风载荷对大桥、高层建筑物稳定性及结构性能的影响；
(10) 温室及室内的空气流动及环境分析；
(11) 电子元器件的冷却；
(12) 换热器性能分析及换热器片形状的选取；
(13) 河流中污染物的扩散、汽车尾气对街道环境的污染；
(14) 血液流动与心脏起搏器的设置；
(15) 食品中细菌的运移等。

图 1-7 列举了一些 CFD 涉及的工程问题。可见，基本上所有的工科专业所涉及的工程领域，都能发现 CFD 的影子，它已成为科研院所、大专院校、设计厂家等用户进行预研、设计、验证等研究的利器。

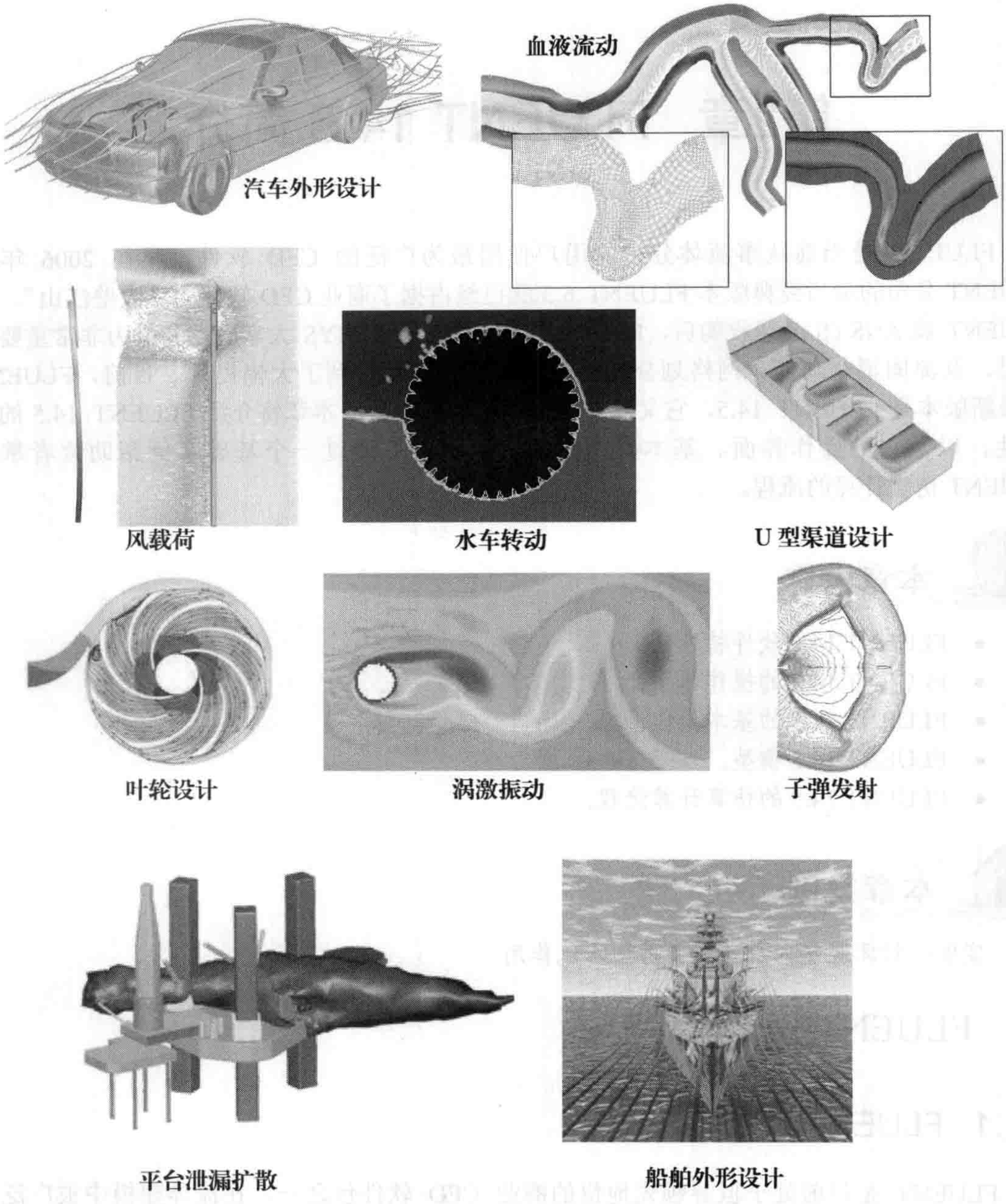


图1-7　CFD 涉及的工程问题

1.4 小结

本章介绍了计算流体力学的基础知识，包括研究对象的物理性质、分类以及作用在流体上的力，阐述了 CFD 求解的流体控制方程，并给出了 CFD 的发展现状与数值计算过程。

第2章 FLUENT 14.5 简介

FLUENT 是当前从事流体分析的用户使用最为广泛的 CFD 软件，早在 2006 年，FLUENT 公司的最后经典版本 FLUENT 6.3 就已经占据了商业 CFD 软件的“大壁江山”。自 FLUENT 被 ANSYS 公司收购后，FLUENT 迅速融入到 ANSYS 大家庭，并成为非常重要的一员，其流固耦合功能、网格划分功能、多场交互性都得到了大幅提升。目前，FLUENT 的最新版本是 FLUENT 14.5，它又有了一些新的功能创新。本章将介绍 FLUENT 14.5 的新特性，以及它的操作界面、基本操作设置和模型，并通过一个基础实例帮助读者掌握 FLUENT 仿真计算的流程。

本章内容

- FLUENT 14.5 软件特性。
- FLUENT 14.5 的操作界面。
- FLUENT 14.5 的基本操作。
- FLUENT 14.5 模型。
- FLUENT 14.5 的仿真计算流程。

本章案例

实例：封闭腔室内滑移壁面剪切水流作用

2.1 FLUENT 14.5 软件特性

2.1.1 FLUENT 软件特性

FLUENT 是目前处于世界领先地位的商业 CFD 软件包之一，在流体建模中被广泛采用。它是一个用于模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象的专用软件，它提供了灵活的网格特性，可以支持多种网格。用户可以自由选择使用非结构化或者结构化网格来划分复杂的几何区域（如：针对二维问题，FLUENT 支持三角形网格或四边形网格；针对三维问题，FLUENT 支持四面体、六面体、棱锥、楔形、多面体网格，同时，FLUENT 也支持混合网格），还可以利用 FLUENT 提供的网格自适应特性在求解过程中根据所获得的计算结果来优化网格。

FLUENT 以用户界面友好而著称，所以对初学者来说非常容易上手。FLUENT 的软件设计基于 CFD 软件群的思想，从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法，在特定领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效率地解决各个领域的复杂流动计算问题。

FLUENT 可以让用户定义多种边界条件，如流动入口及出口边界条件、壁面边界条件等，可以采用多种局部的笛卡儿和圆柱坐标系的分量输入，所有边界条件均可随空间和时间变化，包括轴对称和周期性变化等。

在 FLUENT 中，解的计算与显示可以通过交互式的用户界面来完成。用户界面是通过 Scheme 语言写的。高级用户可以通过写菜单宏及菜单函数自定义及优化界面，也可以使用基于 C 语言的用户自定义函数功能对 FLUENT 进行扩展。

FLUENT 的基本程序结构如图 2-1 所示，一般包括以下几个部分。

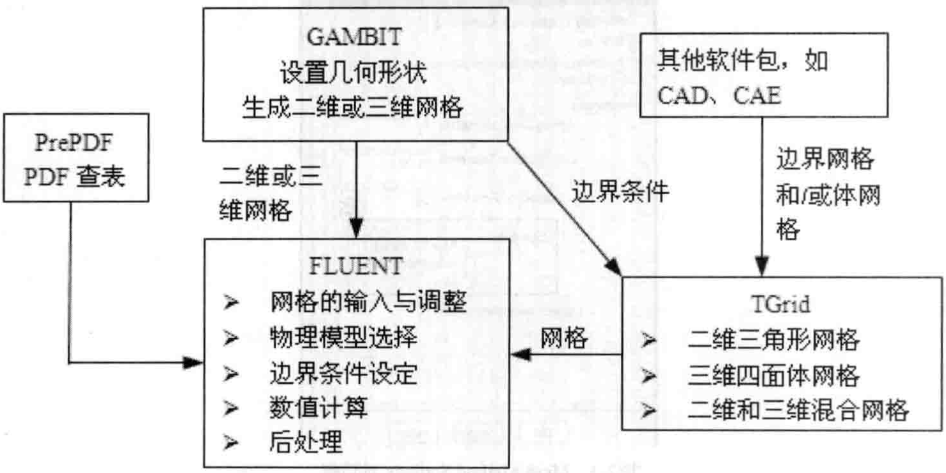


图2-1 FLUENT 程序结构图

2.1.2 FLUENT 14.5 的新特性

一、集成 Meshing 功能

FLUENT 14.5 将 ANSYS TGrid 网格功能集成到 ANSYS FLUENT 环境中。这样，无需离开 FLUENT 环境，用户就可以使用所有的 TGrid 功能创建网格，并无缝切换到 FLUENT 的前处理、求解器和后处理模块，如图 2-2 所示。和基于文件的传输方式相比，用户可以提高仿真的紧凑度，减少一半的数据传输次数。



图2-2 Meshing 模式

二、求解算法

FLUENT 14.5 在求解设置算法时能够利用时间二阶离散格式求解网格变形。在多面体网格（Polyhedral Mesh）中，可以使用基于节点的 Green-Gauss 梯度算法。压力基求解器可以用于指定质量流量的周期流动中。另外，可以使用 profile 或 UDF 定义源项及固定变量。FLUENT 14.5 还增加了求解稳定性方法（Solution Stabilization Methods），用以帮助 System Coupling 方法的收敛。

三、Solver-Meshing

FLUENT 14.5 在 Mesh Method Settings 对话框及 Dynamic Mesh Zones 对话框中增加了额外的控制选项，用以提高灵活性，主要是在不同的网格类型上应用弹簧光顺方法，如图 2-3 所示。

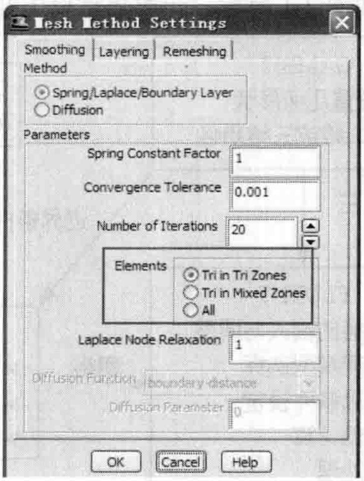


图2-3　Mesh Method Settings 对话框

FLUENT 14.5 可以利用 cutcell zone remeshing 方法，对整个网格区域进行重构，包括重构网格区域的边界（仅用于 3D 模型）；在 Dynamic Mesh Zones 对话框中，对于用户自定义区域类型，增加了新的选项 Exclude Mesh Motion in Boundary Conditions，该选项允许用户指定不包括在该区域的物理边界的网格运动。该选项仅用于非周期边界区域。

四、模型

(1) 湍流模型。

启用湍流模型后，在进出口边界条件设置面板中，默认的湍流强度被设置为 5%（中等强度），湍流黏度的默认值为 10，如图 2-4 所示。

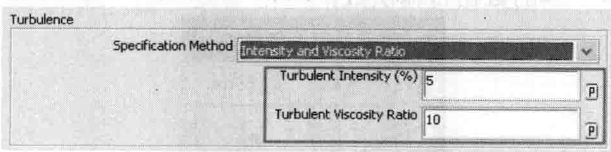


图2-4　湍流强度和湍流黏度默认值

(2) 热传递及辐射。

在使用热传递及辐射模型时，允许周期边界用于使用 ray tracing 方法以计算 view factor

时的 S2S 辐射模型，同时，在读入 S2S 模型计算结果时，增强了耦合壁面的密封性。对于大型复杂模型，在使用热传递及辐射模型时增强了 ray-tracing 方法的效率，提高了 view factor 计算速度。

(3) 燃烧及组分输运。

在燃烧及组分输运模型中，反应流动变量包含了 under the bounded second order time 离散选项。对于使用自动网格加密及二阶插值的非预混及部分预混燃烧模型，具备生成查询表的能力，能够大幅提高运行速度。同时，用户可以利用 TUI 命令/define/models/species/non-premixed-combustion-expert 使用四阶插值。在部分预混燃烧模型中，能够模拟稳态预混小火焰模型。而对于 NO*x* 及 SO*x* 污染模型，能够同时定义多种燃料。在预混及部分预混燃烧模型中，NO*x* 制表能力比以前更快了。

(4) 离散相模型。

在离散相模型中，对于 3D 模型中的圆锥及实心圆锥喷射类型，增加了方位角属性。对于圆锥及实心锥体喷射类型，锥角则能够指定为瞬态 profile。当使用瞬态粒子追踪时，增加了新的粒子包释放方法，而且允许用户指定每一个包中的粒子数量、粒子包的质量或者包的直径等。粒子力平衡可以在选择包含虚拟质量力及压力梯度效应中应用。用户可以使用 DEFINE_DPM_PROPERTY 宏为粒子密度创建 UDF，该功能在使用湿燃烧模型时不可用。

(5) VOF 模型。

在使用 VOF 模型时，静水压力可以通过 profile 加载于非开放明渠流动中。对于设计移动的网格或移动参考系（MRF），用户可以使用 Relative Velocity Resistance Formulation 选项，以更好地预测多孔介质源。同时，用户现在可以通过线性/非线性波叠加的方法生成随机/规则的波，如图 2-5 所示，可以使用 Solitar/Cnoidal 波理论生成包含有限波幅的浅水波。

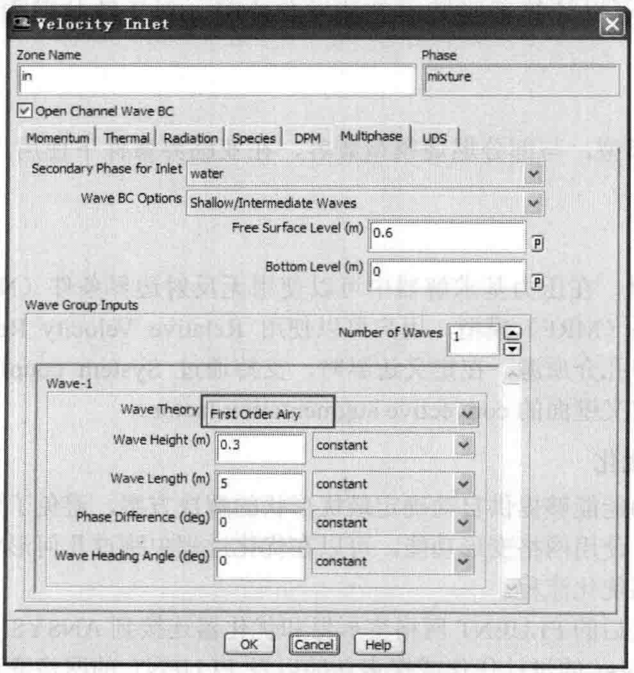


图2-5 VOF 明渠波浪边界条件设置

(6) 欧拉多相流模型。

Grace 及 Tomiyama 的阻力模型在混合多相流及欧拉多相流中已经被实现，如图 2-6 所示。在使用 Mixture 及欧拉多相流中可以使用阻力修正因子。当使用 mixture 模型时，黏性对话框中的 Turbulent Drift Force 被更名为 Mixture Drift Force。当使用稠密离散相模型（DPPM）估计颗粒温度时，增加了额外的方法 DPM-averaged。当使用欧拉多相流模型时，包含了壁面润滑力，用户可以选择代数模型计算界面区域。对于湍流弥散提供了附加模型，用于两相气液流动时，可以使用 degassing 边界条件。

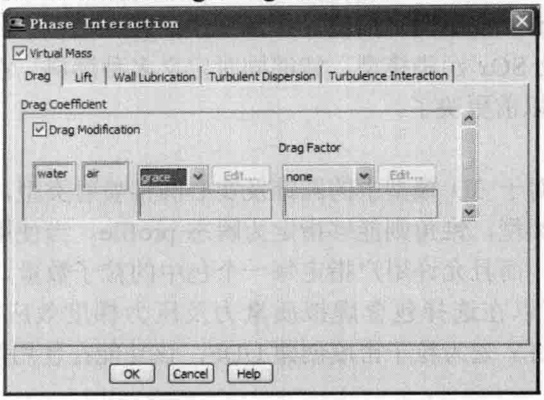


图2-6 Grace 的阻力模型在混合多相流及欧拉多相流的设置

(7) 欧拉壁面薄膜模型。

在使用欧拉壁面薄膜模型时，增加了允许对薄膜使用自适应时间步长的选项，增加了以激活对薄膜分离包含表面张力及随机位置的支持选项。可以计算壁面薄膜与欧拉多相流间的相互作用，同时也可以计算薄膜壁面的蒸发与冷凝。对于欧拉壁面薄膜模型，则可与 Mixture 模型耦合。

五、材料属性

对于真实气体模型，与部分燃烧模型兼容，在亚临界条件下使用，可以选择气相或液相。

六、边界条件

定义边界条件时，在压力基求解器中可以使用无反射边界条件（NRBC）。对于设计移动网格或运动参考系（MRF）模型，用户可以使用 Relative Velocity Resistance Formulation 选项，更好地预测多孔介质源。在定义边界时，支持通过 System coupling 接收壁面的温度及热流数据，能够定义壁面的 convective augmentation factor。

七、网格变形/优化

智能形状优化功能能够提供自动确定最优形状的解决方案，避免了繁重的几何参数定义和输入工作。此外，使用网格变形功能，可以在优化过程中跳过几何形状确定和网格重分步骤，从而大幅度压缩优化流程。

用户可以将改进后的 FLUENT 网格变形器和优化器连接到 ANSYS Design Explorer，同时运用 Design Explorer 的设计优化或探索功能以及 FLUENT 的网格变形优势。此外，该工具简单易用，重新组织了整个图形用户界面，并且改进了控制区生成流程。如图 2-7 所示为

歧管外形优化。

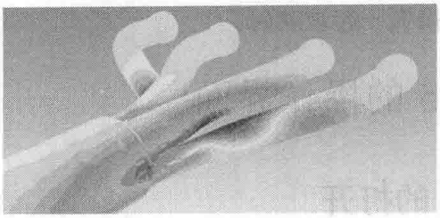


图2-7　歧管外形优化

为减少压降，将红色区域推入，将蓝色区域拉出。Adjoint 求解器的可观察量被扩展为自动可观察量（质量流率、具有不同加权方式的压力和总压积分、流动均匀性）和综合可观察量（和、差、比率、幂的线性组合、方差）。通过支持平移和旋转周期边界，Adjoint 求解器的适用范围得到进一步扩大。后处理得到改进后，可实现更加优质、快速的评估。

八、并行过程

并行过程增强了读/写网格-网格插值文件的性能，增强了 AMG 粗化功能以提高并行计算收敛性，减少了 case 文件读写时间，能够为 DPM 及 DEM 模型激活混合优化分区模型。对于 view factor 的计算，则可使用 viewfac_acc 及 raytracing_acc 方法进行加速。

九、图形界面、后处理及报告

当使用欧拉或 mixture 多相流模型时，指定相的质量流量及体积流量可以作为面检测及面积分报告，新的体积积分报告类型允许报告及检测流体区域中给定相的总质量。当使用监测（体积、面积、力或力矩）时，监测器定义将会根据所反映的区域变化而更新。

十、解监视器

FLUENT 14.5 解监视器（比如升力和阻力监视器）直接显示在 Workbench 环境中，同时在后台进行计算，这样便于了解收敛状态。用户不需打开 FLUENT 应用，从 ANSYS Workbench 窗口就可以监视 ANSYS FLUENT 收敛情况。监视器（表面、体积、升力、阻力或者力矩监视器）可用作收敛判别标准，以便采用一种以上的因素自动判断收敛情况（监测正残值），或者用监视器取代残值，以确保仿真收敛至用户要求的标准。当监视到的结果无明显变化时，尽管残值仍在下降，仍需要利用基于监视器的收敛指标终止求解过程，避免超时运行，以便节省宝贵的仿真时间。

十一、接口

FLUENT 14.5 允许用户选择通过任何其他应用来驱动 FLUENT 仿真的执行。这可将 FLUENT 的功能与其他设计工具相结合，开辟了一条发挥 FLUENT 仿真力量的新途径。新的通信规程使 FLUENT 可以在服务器模式下运行，利用 Matlab、Simplorer、Excel 或其他程序的用户界面完成仿真设置并启动仿真。定制用户界面可以使用应用术语和公司专用术语，并可限制特定用户对 FLUENT 设置的访问。

十二、Workbench

ANSYS 14.5 改进了 ANSYS Maxwell 和 ANSYS FLUENT 之间的双向连接，提供了从 Maxwell 到 ANSYS IcePak 的单向连接，并采用 Workbench 组件迭代器来实现双向 Workbench 耦合模型迭代数量的自动化。

Workbench 14.5 实现了 FLUENT 与 ANSOFT 的双向耦合。当耦合 FLUENT 与 ANSOFT 时，表面损失可以伴随体积损失一起被映射。

2.2 FLUENT 14.5 的操作界面

2.2.1 FLUENT 14.5 的打开

FLUENT 最初只支持 UNIX 操作系统，面向高端用户。随着 Windows 系统的普及，FLUENT 也开始支持 Windows 系统。在 Windows 窗口中运行 FLUENT 的方法有三种。

- 直接利用桌面快捷方式，双击 FLUENT 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择计算问题的维度、启动后的显示方式、是否并行计算等，设置完成后，单击 OK 按钮，即启动了 FLUENT 14.5，如图 2-8 所示。

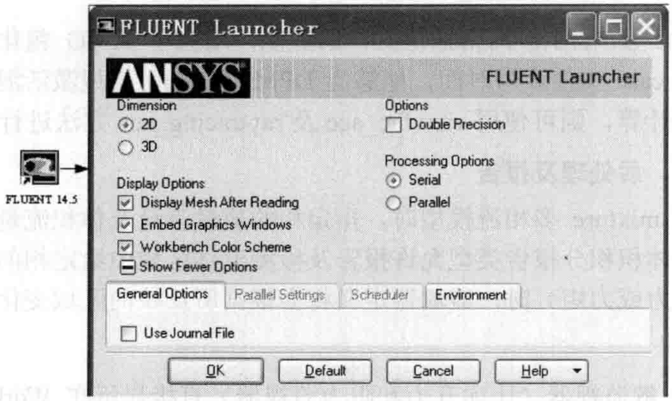


图2-8 FLUENT Launcher 窗口

- 选择“开始”菜单中的“运行”命令，在命令提示符中输入“FLUENT”，按回车见，弹出 FLUENT Launcher 窗口，其余同上。
- 选择“开始”菜单中的“所有程序”，选择“ANSYS 14.5”→“FLUENT Dynamics”→“FLUENT 14.5”命令，即弹出 FLUENT Launcher 窗口，其余同上。

FLUENT 的操作界面有两种：图形界面（GUI）和文本界面（TUI），控制包括菜单按钮的图形界面和终端仿真程序。

2.2.2 FLUENT 14.5 图形界面

FLUENT 14.5 图形界面由操作面板、图形窗口、下拉菜单及对话框组成，如图 2-9 所示。刚启动 FLUENT 14.5 时，左侧显示控制树，右侧显示图形窗口。当用户选择左侧控制树的某项命令时，具体的子命令列表会在中间的控制面板展开，这是与之前的 FLUENT 版本不一样的地方。老版本的用户若不习惯这种 ANSYS 式操作方式，则可以利用菜单命令，如单击 Define 菜单即可弹出其下拉菜单。当用户执行 Results 命令时，图形窗口会出现相应的结果图像。此外，许多命令在执行过程中还会弹出对话框。

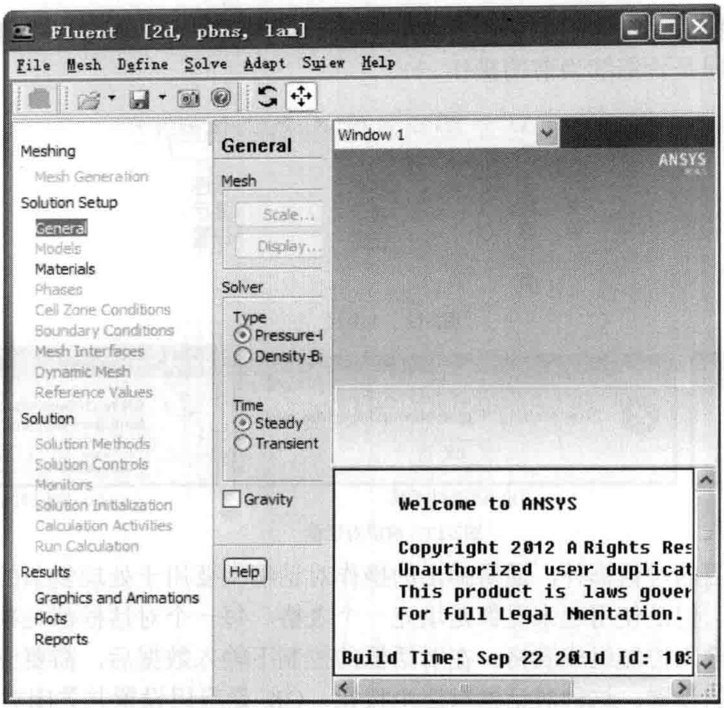


图2-9　FLUENT 图形界面

FLUENT 14.5 菜单栏包含了 11 个菜单，如图 2-10 所示，它们是按运行的步骤顺序有层次地组织在一起的。FLUENT 菜单提供了操作面板的大部分命令，其下拉菜单的使用方法和 Windows 一样，直接单击即可弹出相应的面板或对话框，如选择 Display 下拉菜单中的 Graphics and Animations 命令，则会展开如图 2-11 所示的 Graphics and Animations 面板。

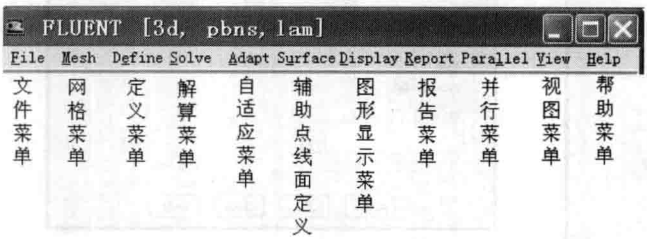


图2-10　FLUENT 菜单

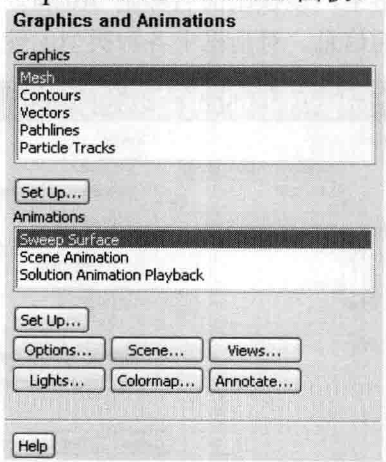


图2-11　Graphics and Animations 面板

FLUENT 14.5 菜单栏下方还有一个工具栏，如图 2-12 所示。用户可以利用其打开和保存文件，设置图形显示和视图窗口的形式。

FLUENT 14.5 在操作中经常会弹出一类对话框，用于完成简单的输入/输出任务，如警告、错误和询问，如图 2-13 所示。此类对话框是临时窗口，出现时要对其进行响应。如信

息提示框提示我们需要知道的信息，查看后单击 OK 按钮即可；而警告对话框用于警告某些潜在问题，并询问是否继续当前的操作。

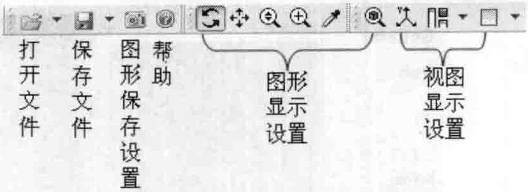
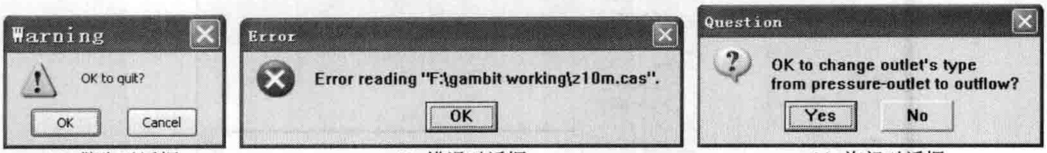


图2-12　工具栏



(a) 警告对话框　　(b) 错误对话框　　(c) 询问对话框

图2-13　响应对话框

除了需要响应的对话框外，通常弹出的操作对话框主要用于处理复杂的输入任务，该类对话框是独立的，但是使用起来更像是填充一个表格。每一个对话框都是独一无二的，而且使用各种类型的输入控制组成表格。在对话框的控制下输入数据后，需要应用所改变的设置或者取消所改变的设置。这种对话框有三个按钮：OK 是应用设置并关闭对话框；Cancel 是关闭对话框而不做任何改变，Help 是启用帮助文件，如图 2-14 所示。

若应用所改变的设置之后仍然不关闭对话框，这时可以做更多的设置。后处理和自适应网格中经常会出现这样的对话框，如图 2-15 所示。Apply 按钮表示应用设置后不关闭对话框，这一按钮经常也有其他的名称，比如后处理过程中，该按钮的名称是 Display；自适应网格中，该按钮的名称是 Adapt。所有的对话框都包含 Help 按钮，用于显示如何使用对话框的信息。对话框中各种类型的输入控制如表 2-1 所示。

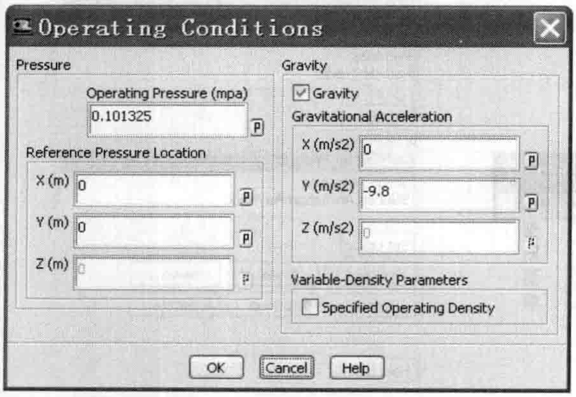


图2-14　Operating Conditions 对话框

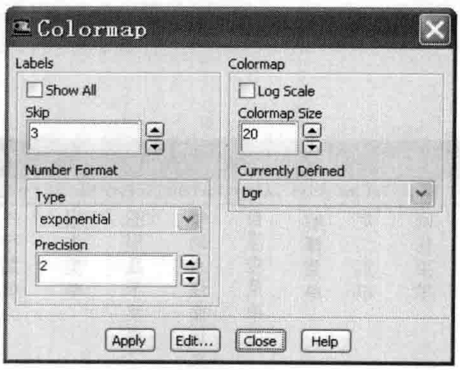
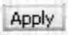
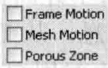
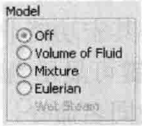
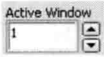
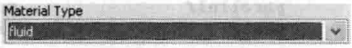
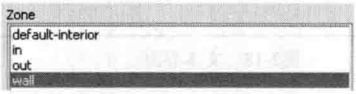
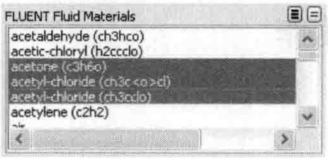
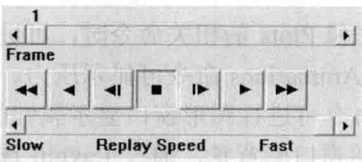


图2-15　Colormap 对话框

FLUENT 14.5 的右上角为图形显示窗口，如图 2-16 所示。后处理中，可通过显示选项对话框来控制图形显示的属性，如图 2-17 所示。

表 2-1　对话框中的各种类型的输入控制

输入控制	视图显示
按钮	
复选框	
单选按钮	
文本输入框	
微调框	
数据输入框	
下拉列表	
单选列表	
多选列表	
标尺	

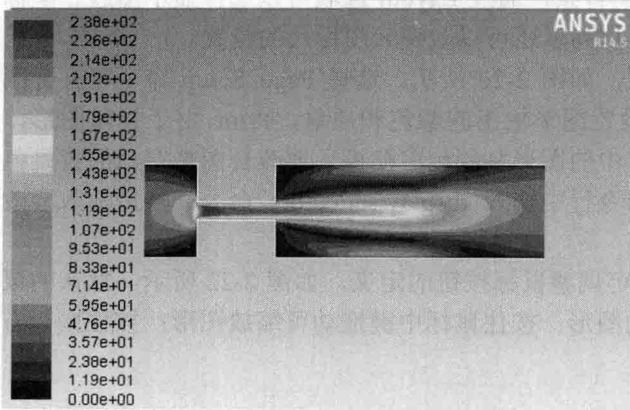


图2-16　图形显示窗口

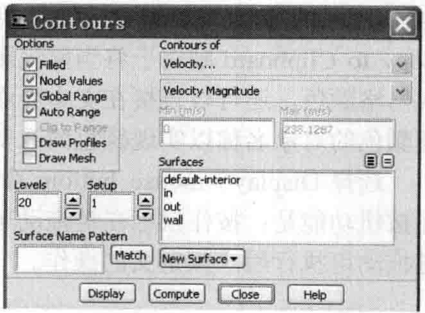


图2-17　Contours 对话框

2.2.3 FLUENT 14.5 文本界面

FLUENT 14.5 操作界面的右下角为文本界面。文本界面中的命令行提示符位于最下面一行，刚启动 FLUENT 时，显示为“>”。用户可借助文本界面输入各种命令、数据和表达式。另外，FLUENT 14.5 也正是利用该窗口显示文本信息，从而达到用户与 FLUENT 交互的目的。需要说明的是，文本界面使用 Scheme 编程语言对用户输入的命令和表达式进行管理。Scheme 是 LISP 语言的一种，简单易学，尤其是其宏功能非常有用。用户可在命令行提示符下输入各种命令或 Scheme 表达式，直接按回车键可显示当前菜单层次下的所有命令。如在根目录下直接按回车键，则显示菜单栏相对应的同名命令，如图 2-18 所示。在命令行提示符下，用户除了可以输入 FLUENT 命令外，还可以输入由 Scheme 函数组成的具有复杂功能的 Scheme 表达式，详细信息参阅 FLUENT 用户手册。

```
Done.


>
adapt/              file/               report/
define/             grid/               solve/
display/            parallel/           surface/
exit                plot/               view/

>
```

图2-18　文本界面

2.3 FLUENT 14.5 基本操作

2.3.1 图形控制及鼠标使用

执行 Graphics and Animations 和 Plots 的相关命令时，可进行图形显示内容的选择和属性方面的设置。通过 Graphics and Animations 命令可显示压力、速度等物理量的云图（或等值线图）；通过 Display→Options 命令可进行图形窗口显示属性的修改，如图 2-19 所示；通过 Color Scheme 选项可以改变视图窗口的背景，通过 Layout 选项可以选择显示图题、坐标轴、标尺等，利用 Colormap Alignment 下拉列表还可以改变云图标尺的位置。

右击图形窗口左上角，弹出三个选项，如图 2-20 所示。选择 Page Setup 命令可打开图 2-21 所示的 Page Setup 对话框，用于设置图形输出的颜色和质量，Print 用于打印图形，Copy to Clipboard 则用于将当前视图窗口中的图形复制到剪贴板。要改变图形窗口的背景色或网格颜色，还可以直接在文本界面的命令行中输入 display/set/colors 命令，然后输入要改变颜色的对象名称以实现颜色的改变。

选择 Display→mouse buttons 命令，可调整鼠标按钮的定义，如图 2-22 所示。默认的鼠标按钮功能是：按住鼠标左键拖动可移动图形；按住鼠标中键拖动可缩放图形；按住鼠标右键拖动可执行用户预定义的操作。

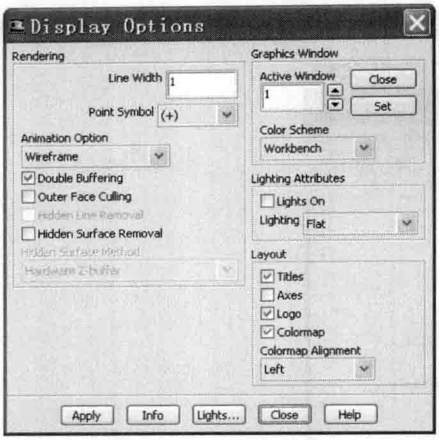


图2-19 Display Options 对话框

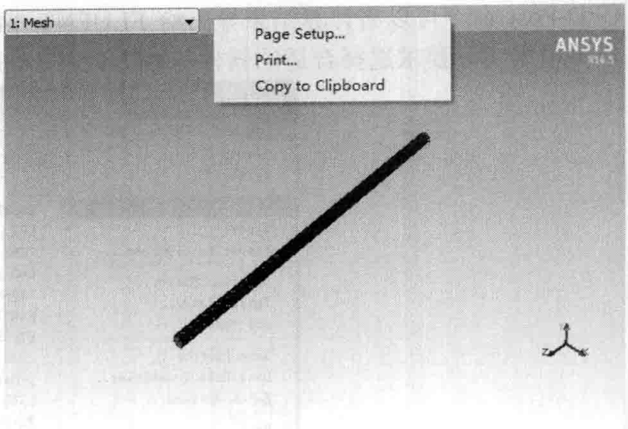


图2-20 图形输出选项

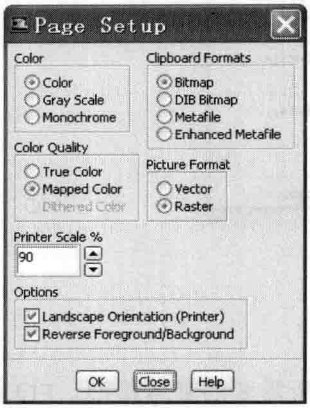


图2-21 Page setup 对话框

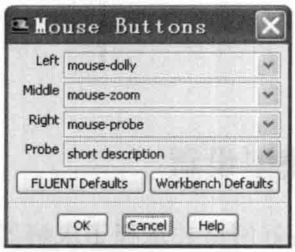


图2-22 Mouse Buttons 对话框

2.3.2 网格读入

一般情况下，我们只需将保存的.msh 文件读入 FLUENT 中，执行 File→Read→Mesh 命令可将绘制好的网格导入 FLUENT 14.5 中，如图 2-23 所示。

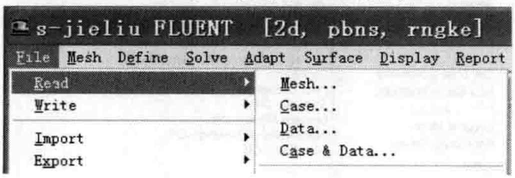


图2-23 msh 文件的读入

FLUENT 14.5 还可以调入其他软件的数据文件，用户只需选择 File→Import 命令，即弹出可将数据文件导入 FLUENT 14.5 的其他软件列表，几乎涵盖了现有有限元和有限体积法软件，如图 2-24 所示。CGNS、Gambit、PLOT3D 等软件主要提供网格文件，ABAQUS、CFX、PATRAN 等软件可提供其自身计算的算例和结果文件，Tecplot 软件则可提供后处理过的结果文件。除了可以导入上述软件的数据文件外，FLUENT 14.5 也可将自身的算例和结果文件导出。与 FLUENT 6.3 版本不一样的是，FLUENT 14.5 菜单中的 File→Export to

CFD-Post 命令可以将计算结果导出给 FLUENT 14.5 自带的 CFD 后处理软件进行处理。用户可根据实际要求选择合适的软件与 FLUENT 14.5 进行数据交换。



图2-24　数据的调入

2.3.3　模型设置

在准备好网格并选择了求解器的格式后，就应设置所需要的基本模型。FLUENT 14.5 中提供了很多模型，例如多相流模型、传热模型、湍流模型、组分输运模型等。针对不同的问题，我们需要设置不同的模型。在 FLUENT 14.5 中设置模型，基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Models，在中间弹出的 Models 控制面板下就可以设置模型了，如图 2-25 所示。

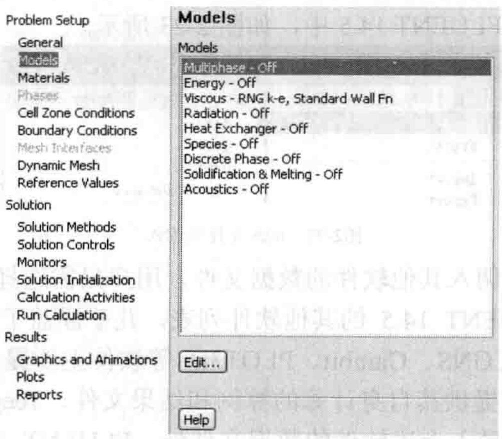


图2-25　Models 控制面板

2.3.4 材料属性设置

FLUENT 14.5 在其材料数据库中已经提供了如 air 和 water 等一些常用材料，用户可从中复制过来直接使用，或修改后使用。当然，用户还可创建新的材料，以便将材料分配给相应的区域。在 FLUENT 14.5 中定义材料，其基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Materials，中间弹出 Materials 控制面板，如图 2-26 所示。选择你所需要定义材料的物性，是流体还是固体，单击 Create/Edit... 按钮打开 Materials 操作对话框，如图 2-27 所示。用户可以根据实际问题，选择是调用 FLUENT 14.5 材料数据库中的材料，还是自定义材料性质。所有材料的定义、复制和修改，都是通过 Materials 操作对话框来实现的。

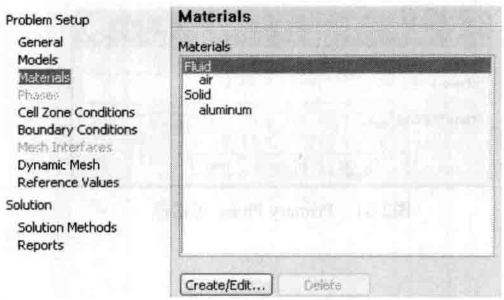


图2-26　Materials 控制面板

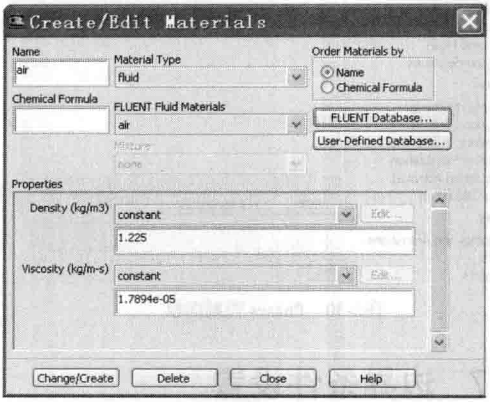


图2-27　Materials 操作对话框

2.3.5 计算域材料选择

FLUENT 14.5 要求为每个参与计算的区域指定一种材料。在定义好我们所需要的材料以后，就需要为每一个区域指定材料。在 FLUENT 14.5 中为每个参与计算的区域指定材料，其基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Cell Zone Conditions，中间弹出 Cell Zone Conditions 控制面板，如图 2-28 所示；选择所需定义材料的区域，单击 Edit... 按钮打开 Fluid 对话框，如图 2-29 所示。所有区域材料的定义，都是通过 Fluid 对话框来实现的。

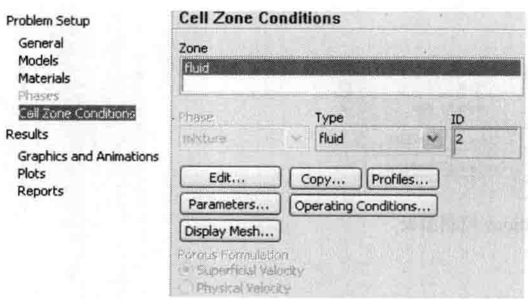


图2-28　Cell Zone Conditions 控制面板

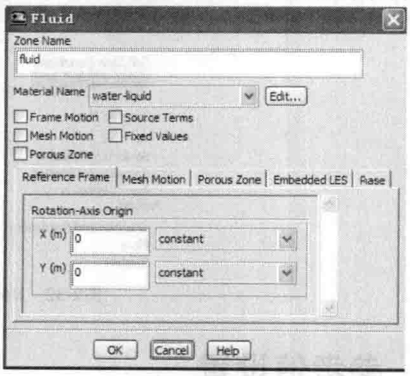


图2-29　Fluid 对话框

2.3.6 流体相设置

有时候我们所要计算的区域含有多个相，例如坝体垮塌时水与空气、敞口旋转容器内水与空气等，这时候我们就需要定义流体相。定义流体相的基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Phases，中间弹出 Phases 控制面板，如图 2-30 所示；选择你所需要定义的相，单击 Edit... 按钮打开 Primary Phase 对话框，如图 2-31 所示。

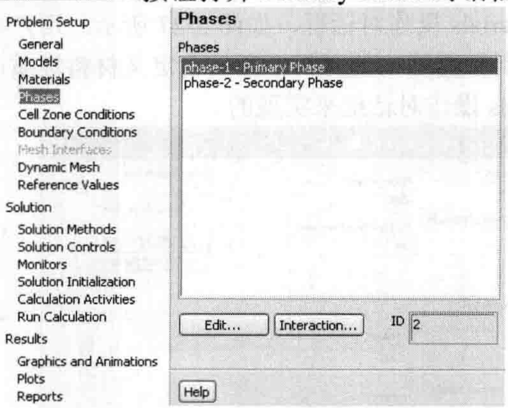


图2-30　Phases 控制面板

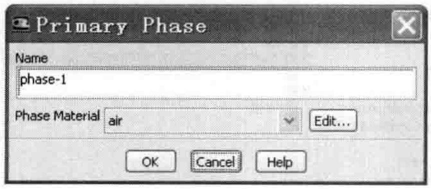


图2-31　Primary Phase 对话框

2.3.7 边界条件设置

在 FLUENT 14.5 中提供了多种边界条件，常用的有压力入口、速度进口、质量进口、压力出口、自由出流和壁面条件等，根据不同的计算要求，我们需要定义不同的边界条件。定义边界条件的基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Boundary Conditions，中间弹出 Boundary Conditions 控制面板，如图 2-32 所示；选择你所需要设置的边界，单击 Edit... 按钮打开相应的对话框，进行边界条件设置。我们所有的边界条件设置都是通过对话框进行的。

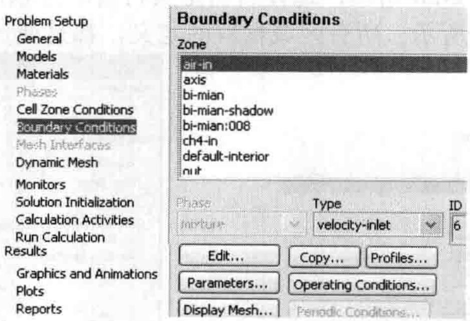


图2-32　Boundary Conditions 控制面板

2.3.8 参考值设置

在 FLUENT 14.5 中，设置参考值的基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Reference

Values，中间弹出 Reference Values 控制面板，如图 2-33 所示，我们可以在这里进行参考值的设置。

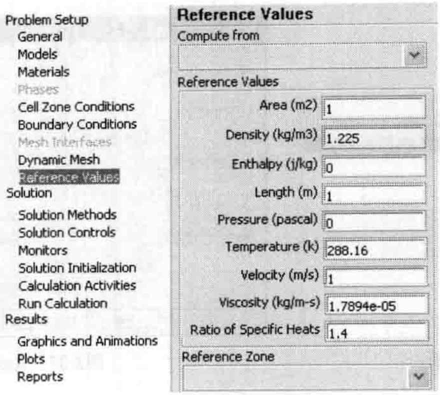


图2-33 Reference Values 控制面板

2.3.9 算法设置

FLUENT 14.5 为我们提供了多种算法，例如 SIMPLE 算法、SIMPLEC 算法、PISO 算法以及 Coupled 算法。设置算法的基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Solution Methods，中间弹出 Solution Methods 控制面板，如图 2-34 所示。在这里，我们可以进行算法的设置与离散化的设置。若要设置求解方程的欠松弛因子，可在左侧的控制树处选择 Solution Controls，在中间弹出的 Solution Controls 控制面板中进行设置，如图 2-35 所示。

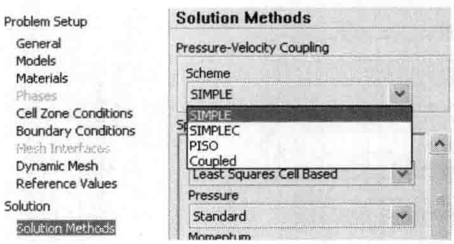


图2-34 Solution Methods 控制面板

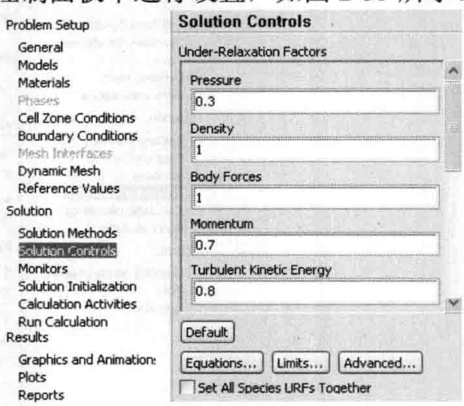


图2-35 Solution Controls 控制面板

2.3.10 监视参数设置

在求解过程中，通过检查变量的残差、统计值、力、面积分和体积分等，用户可以动态地监视计算的收敛性和当前计算结果、显示或打印升力、阻力、力矩系数、表面积分及各个变量的残差。对于非稳态流动，用户还可监视时间进程。设置监视参数的基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Monitors，中间弹出 Monitors 控制面板，如图 2-36 所示；双击“Residuals-Print，Plot”选项或单击 Edit... 按钮，打开 Residual Monitors 对话框，如图 2-37

所示。在这里，我们可以设置要监视哪些变量的残差、如何监视、每隔多少个迭代步监视一次、如何输出监视结果等。

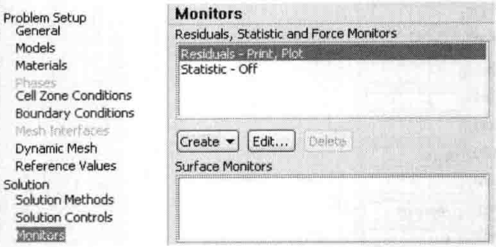


图2-36 Monitors 控制面板

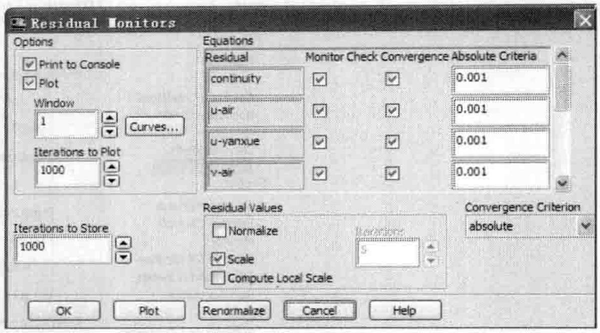


图2-37 Residual Monitors 对话框

2.3.11 计算初始化设置

在开始对流场进行求解之前，用户必须向 FLUENT 提供对流场的解的初始猜测值。该初始值对解的收敛性有重要的影响，与最终的实际解越接近越好。计算初始化的基本操作步骤是：在左侧的控制树处选择 Solution Initialization，中间弹出 Solution Initialization 控制面板，如图 2-38 所示。在这里，我们可以设置初始化的方式、获得初始值的方式等。

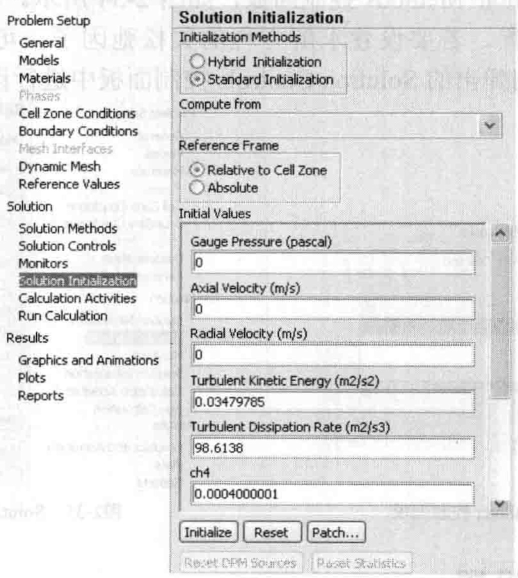


图2-38 Solution Initialization 控制面板

2.3.12 迭代计算设置

在进行了前面各项设置以后，便可开始流场的迭代计算了。稳态问题与瞬态问题的迭代计算方法有所区别，在这我们分别进行设置。在左侧的控制树处选择 Run Calculation，中间弹出 Run Calculation 控制面板，对于稳态问题，只需设置迭代的步数，如图 2-39 所示；而

对于瞬态问题，则需要设置时间步长和迭代次数等，如图 2-40 所示。

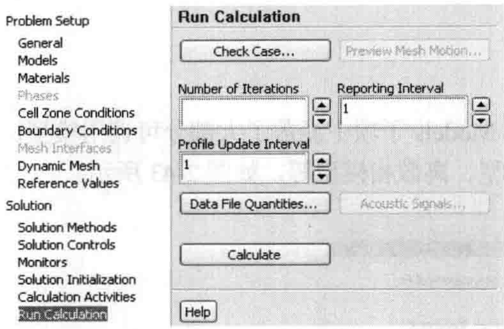


图2-39　稳态问题的 Run Calculation 控制面板

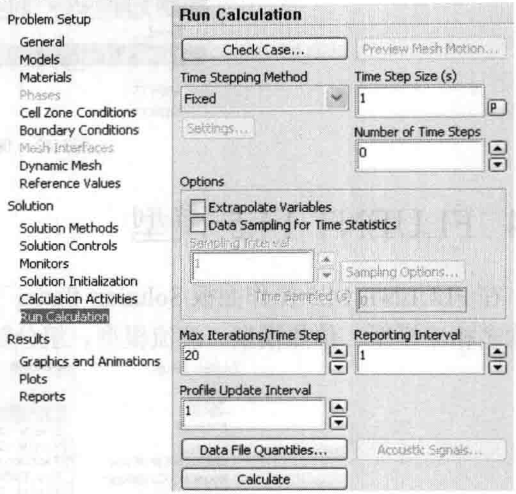


图2-40　瞬态问题的 Run Calculation 控制面板

2.3.13　结果查看

为了得到形象直观的图形结果，模拟计算完后还需进行后处理。FLUENT 本身具备一定的后处理功能及图形可视化技术，能够显示相关物理参数的云图、等值线图、速度矢量图、流动轨迹图等，同时还能求得力、力矩及对应的力矩系数、流量等，并生成简要的计算报告。在左侧的控制树处选择 Graphics and Animations，中间弹出 Graphics and Animations 控制面板，如图 2-41 所示。在这里，可以进行云图、等值线图、速度矢量图、流动轨迹图等后处理操作。

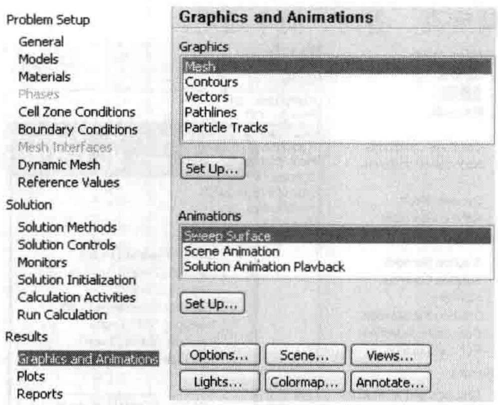


图2-41　Graphics and Animations 控制面板

2.3.14　结果保存

最后，需要保存工程和数据文件。执行 File→Write→Case&Date 命令，将当前定义的全部信息及计算结果保存到案例文件和数据文件，如图 2-42 所示。

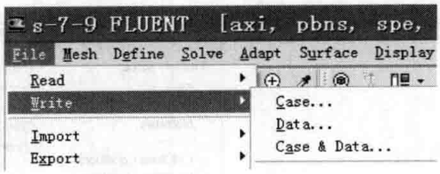


图2-42 保存设置文件

2.4 FLUENT 14.5 模型

在 FLUENT 14.5 操作面板 Solution Setup 下方的 Models 子项中涵盖了大部分可调用模型，包含多相流模型、传热模型、湍流模型、组分输运模型、离散相模型等，如图 2-43 所示。

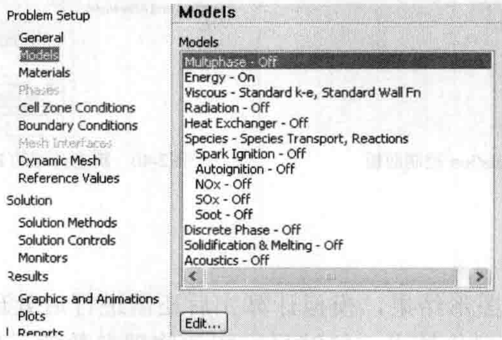


图2-43 Models 控制面板

2.4.1 湍流模型

FLUENT 14.5 提供的湍流模型如图 2-44 所示。实际求解中，应根据具体问题的湍流特点来决定，选择的原则是精度高、省时、简单通用。

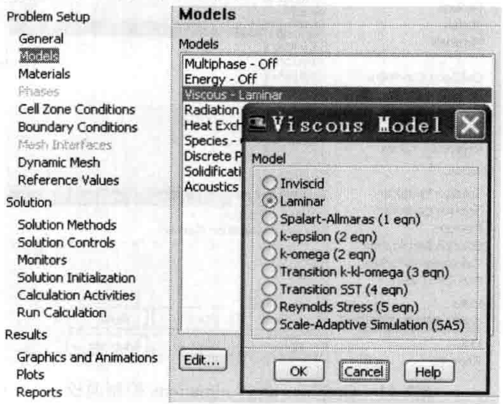


图2-44 湍流模型

2.4.2 传热模型

热传递是一种复杂的物理现象，除了遵循热力学第一定律和第二定律外，还有其特殊的规律。通常，按其物理本质的不同，可以把它分为传导、对流和辐射三种基本方式。在静止

的液体中发生的热传递也主要取决于导热，而在流动的液体及流动或静止的气体中，热传递主要靠对流或热辐射。激活传热计算模型需要单击操作面板中的 Problem Setup→Models→Energy，选中 Energy 对话框上的 Energy Equation 复选框，如图 2-45 所示。

FLUENT 14.5 中可以用 5 种模型来计算辐射换热问题，分别为离散换热辐射模型（DTRM）、P1 辐射模型、Rosseland 辐射模型、表面辐射模型（S2S）和离散坐标辐射模型（DO），如图 2-46 所示。

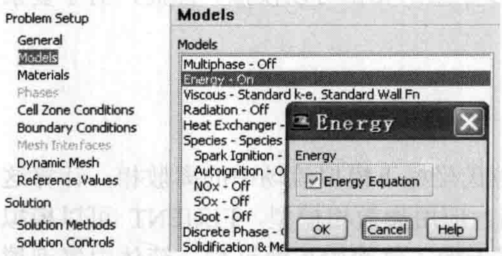


图2-45　激活传热模型

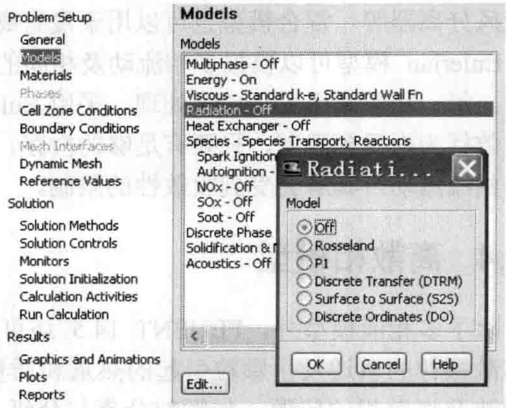


图2-46　辐射模型

除了调用传热模型外，还需设置流动入口、出口和壁面上的热边界条件及流动材料的热物理参数。

2.4.3　多相流模型

物质具有气态、液态、固态三相，自然界和工程中的很多问题都涉及多相流动。多相流动可以分为气液流动、气固流动、液液流动、液固流动及三相流动。如空气泵、气穴、蒸发的气泡流、喷雾、干燥机、气冷的液滴流、旋风分离器的粒子负载流等都属于多相流动。FLUENT 14.5 的多相流模型主要包括 VOF 模型、Mixture 模型和 Eulerian 模型，如图 2-47 所示。

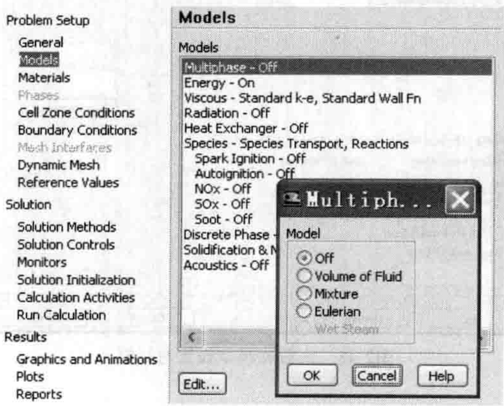


图2-47　多相流模型

VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法，通过求解单独的动量方程和处

理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟两种或三种不能混合的流体。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。典型的应用例子包括分层流、射流破碎、液体中的气泡运动、自由表面流动等。

Mixture 模型是一种简化的多相流模型，可用于模拟两相或多相具有不同速度的流动（流体或颗粒）。混合模型通过求解混合相的连续性、动量和能量方程，第二相的体积分数方程，以及相对速度的代数方程来实现。典型的应用包括低质量载荷的粒子负载流、气泡流及旋风分离器等。混合模型也可以用于没有离散相相对速度的均匀多相流。

Eulerian 模型可以模拟多相流动及相间的相互作用。相可以是气体、液体、固体的任意组合。每一相都采用 Eulerian 处理。采用 Eulerian 模型时，第二相的数量仅仅因为内存要求和收敛行为而受到限制，只要有足够的内存，任意多个第二相都可以模拟。然而，对于复杂的多相流流动，其解会受到收敛性的限制。

2.4.4 离散相模型

除了多相流模型外，FLUENT 14.5 还可以在拉氏坐标下模拟流场中的离散相，计算这些离散颗粒的轨道及由颗粒引起的热量和质量传递。应用离散相模型，FLUENT 可以模拟各种涉及离散相的问题，如颗粒分离与分级、喷雾干燥、气溶胶扩散过程、液体中气泡搅浑、液体燃料的燃烧及粉煤燃烧等。

FLUENT 中的离散相模型假定第二相非常稀薄，因而颗粒与颗粒之间的相互作用、颗粒体积分数对连续相的影响均未加以考虑。这种假定意味着分散相的体积分数必然很低，一般来说要小于 10%~12%，但颗粒质量承载率可以大于 10%~12%，即用户可以模拟分散相质量流率大于连续相的流动。

选择 Models→Discrete Phase 命令，弹出图 2-48 所示的 Discrete Phase Model 对话框，即可供用户进行离散相模型的设置。

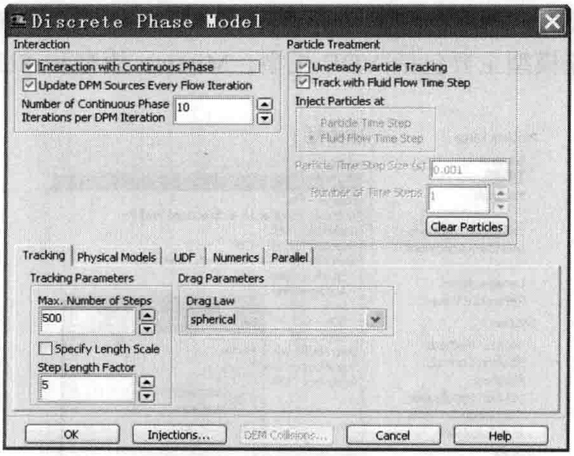


图2-48 离散相模型设置对话框

2.4.5 组分输运与化学反应模型

FLUENT 14.5 强大的化学反应模拟能力能够模拟各种复杂的燃烧与化学反应过程，多

年来帮助工程师们解决了多个工程实际难题，如 NO_x 和其他污染形成的气相反应，固体壁面发生的表面反应，粒子表面反应等。在实际工程中，经常遇到有组分输运与化学反应的问题，最常见的化学反应是燃烧。燃烧按照参与反应的流体可以分为单相燃烧和多相燃烧，按照反应前后各组分的分布可以分为预混燃烧、扩散燃烧和部分预混燃烧，按照燃烧的状态可以分为稳态燃烧和非稳态燃烧，按照反应时间和扩散时间的关系可以分为快速反应和有限反应。在湍流燃烧中，反应速率和流动是相互耦合的，燃烧速率除了取决于化学动力学外，还取决于流场。

FLUENT 14.5 针对不同的组分输运与化学反应问题具有相应的解算模型，包括通用有限速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混燃烧模型及 PDF 输运方程模型，如图 2-49 所示。

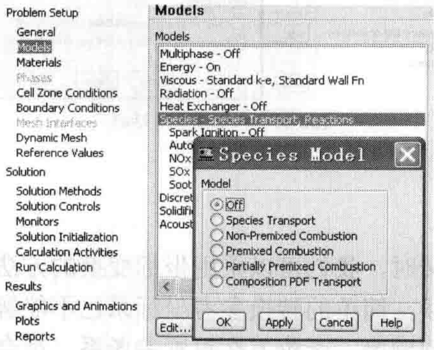


图2-49　组分输运与化学反应模型对话框

2.4.6 凝固与融化模型

实际生活中经常出现凝固与融化现象，工程实际中也存在着大量的与凝固和融化相关的问题，如冬天水结冰、油库的油凝结等，这类问题涉及相变。FLUENT 为此提供了凝固与融化模型，用户只需单击 Problem Setup 操作面板下方 Models 子项中的 Solidification & Melting 选项，即可弹出图 2-50 所示的 Solidification and Melting 对话框，选中 Solidification/Melting 复选框即启动了凝固与融化模型。

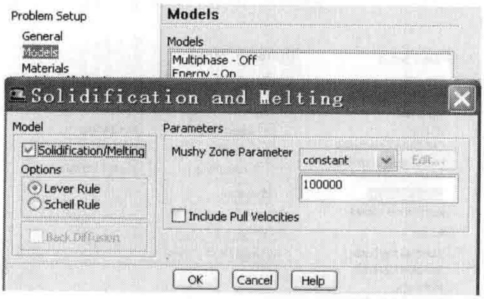


图2-50　凝固与融化模型对话框

2.4.7 声学模型

FLUENT 14.5 可以用来预测空气动力学所产生的声学特性（Acoustics），如噪声。在

Defint/Models/Acoustics 命令下，有 Models & Parameters、Sources、Receivers、Read & Compute Sound 四个命令，分别用于设置声学模型和参数、声源、声音接收位置，以及读取和计算声压信号的有关文件。用户只需双击 Models 控制面板的 Acoustics 选项，即可弹出图 2-51 所示的 Acoustics Model 对话框，选中 Ffowcs-Wiliams & Hawkings 单选按钮，即声学模型。

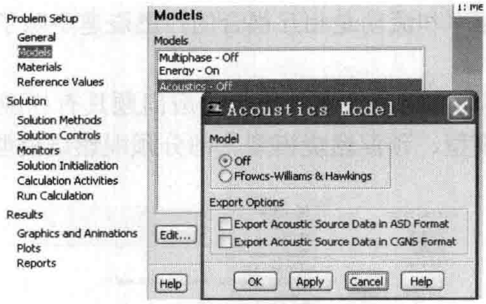


图2-51　声学模型对话框

2.4.8　动网格模型

对于单一物体运动或旋转时，我们可以采用坐标变换的方法来简化问题。然而，当多个物体之间存在相对旋转的时候，简单的转换参考坐标系已不能解决问题，如涡轮发动机、叶轮机械中静子和转子的干扰问题等，无论怎么设置参考系，都会遇到固体边界随时间变化的问题。这类问题可以利用 FLUENT 中相关的动网格模型来解决。

动网格模型主要用于模拟由于流域边界运动引起流域形状随时间变化的流动情况。流动既可以是明确的运动（如具有明确的线速度或角速度），也可以是未知的运动（其绕物体重心的线速度或角速度是由流域中固体上的受力平衡得出的），下一时间步的运动情况是由当前时间步的计算结果确定的。在计算之前要先定义动网格的初始状态，在边界发生运动或变形后，其流域的网格重新划分是在 FLUENT 内部自动完成的，而边界的形变和运动过程可以用边界型函数来定义，也可以用 UDF 函数来定义。动网格模型求解的是非定常问题，需要消耗较大的硬件资源。动网格模型的调用可单击 Problem Setup 下方的 Dynamic Mesh 选项，如图 2-52 所示。

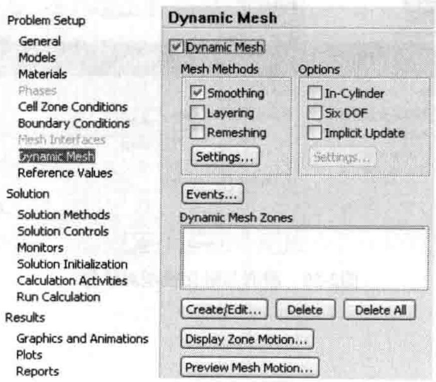


图2-52　动网格模型面板

2.4.9 UDF 的使用

对于一些复杂的初始条件、边界条件、物性参数等，用户可以自定义相关程序导入 FLUENT 使用。这类用户自定义的函数称为 UDF，是用户自编的程序，可以被动态地连接到 FLUENT 求解器，以提高求解器的性能。UDF 编写好之后，需要通过解释或编译将其加载到 FLUENT 中。解释和编译的英文分别为 interpret 和 compile，如图 2-53 所示。UDF 解释是最简单的加载方法，优点是不需要安装 C 编译器，适合简单的 UDF 程序。

UDF 解释的过程很简单，首先将编写好的 UDF 文件放至工作目录下，然后选择 FLUENT 菜单中的 Define→User-Defined→Functions→Interpreted 命令，弹出图 2-54 所示的 UDF 解释对话框，在 Source File Name 文本框中输入编写好的 UDF 文件名（后缀名为“.c”），或利用 Browse 按钮查找 UDF 文件，单击 Interpret 按钮，即开始了 UDF 的解释。若选中 Display Assembly Listing 复选框，视图窗口中还会显示解释信息列表。如果程序有错误，FLUENT 会提示错误的原因及发生错误的程序行数。

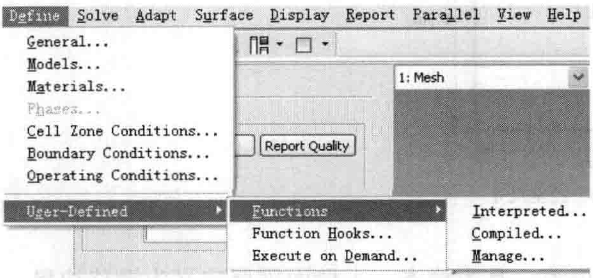


图2-53 UDF 加载方式

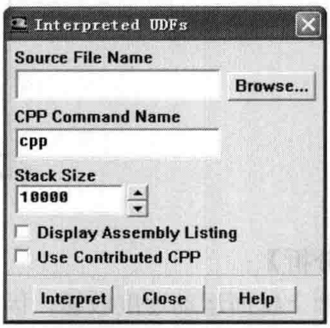


图2-54 UDF 解释对话框

由于有些 UDF 函数不支持解释运行，故需要对其进行编译。编译的前提是必须正确安装 C/C++编译器。

正确安装 C/C++编译器之后，选择 FLUENT 菜单中的 Define→User-Defined→Functions→Compiled 命令，弹出图 2-55 所示的 UDG 编译对话框。

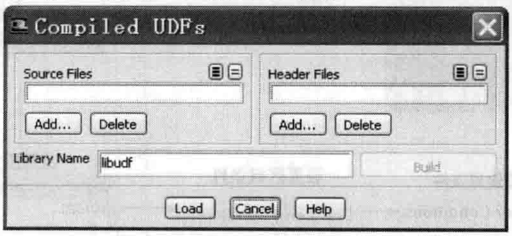


图2-55 UDF 编译对话框

对话框左侧的 Source Files 列表用于增加和显示 UDF 程序，右侧的 Header Files 列表用于增加和显示需要的头文件。单击左侧 Source Files 列表下的 Add 按钮，在弹出的 Select File 对话框中查找需要加载的 UDF 文件，单击 OK 按钮关闭 Select File 对话框。

回到编译对话框中，即可发现 Source Files 列表中已经出现了加载进来的 UDF 文件名，此时需要用户在 Library Name 文本框中输入共享库的名字，并单击 Library Name 右侧的 Build 按钮，建立一个共享库，同时编译 UDF 文件，并把编译好的 UDF 文件放入该共享库

中。若编译正确，则可单击 Load 按钮把编译好的 UDF 文件装载到当前工程中来应用。

2.5 FLUENT 14.5 基础实例演示

本例通过对简单封闭腔室内滑移壁面剪切水流作用进行模拟，介绍运用 FLUENT 进行数值仿真计算的基本步骤，帮助读者系统地认知 FLUENT 的操作流程。

2.5.1 案例简介与思路分析

【实例概述】

图 2-56 所示为封闭腔室，箱体长宽均为 0.5m，上壁面以 0.01m/s 的速度平移，其他三个壁面固定。

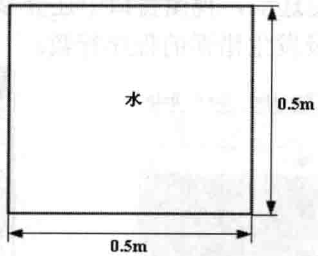


图2-56 腔室尺寸

【思路分析】

本例上壁面运动速度较缓，因此流动为层流，且为稳态。上壁面需要定义为滑移边界，整个模拟计算流程如图 2-57 所示。

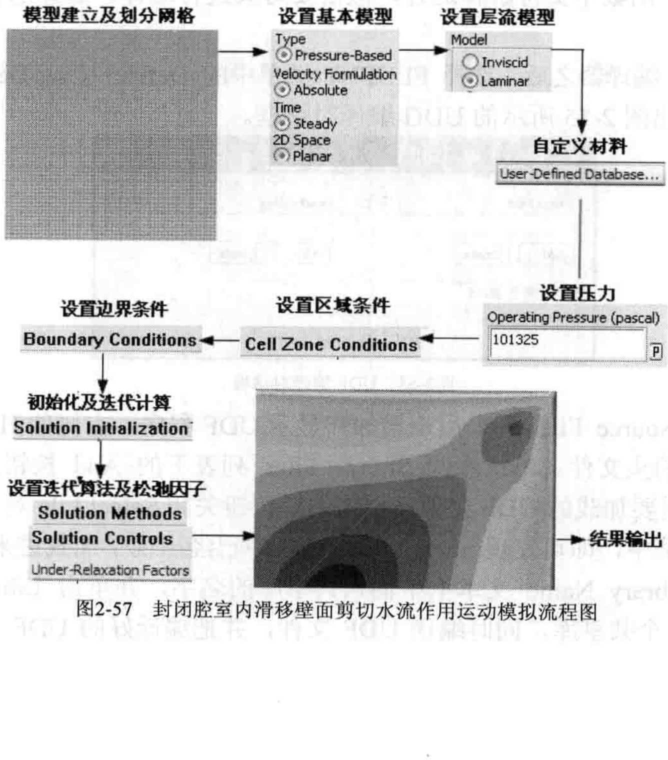


图2-57 封闭腔室内滑移壁面剪切水流作用运动模拟流程图

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch2\2-5.msh、2-5.cas、2-5.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch2\2-5.avi”文件。

2.5.2 几何建模

启动Gambit，单击→→按钮，打开Create Real Rectangular Face面板，如图2-58所示。在Create Real Rectangular Face面板下的Width和Height文本框中均输入0.5，在Direction下拉列表中选择+X+Y方向，单击Apply按钮，生成图2-59所示的面。

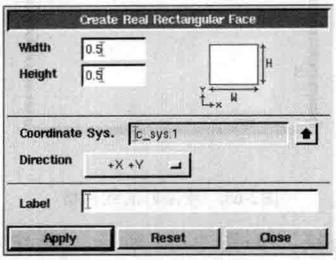


图2-58 Create Real Rectangular Face面板



图2-59 绘制好的面

2.5.3 网格划分

1. 单击→→按钮，弹出Create Boundary Layer面板，如图2-60所示。在Attachment下Edges右侧的黄色输入栏中选中线段1、线段2、线段3、线段4，视图中4条线都会出现一个红色的箭头，均指向箱体内部，代表着边界层生成的方向。然后，选中1:1的边界层生成方式，并设置第一个点距离壁面距离为0.001m，递增比例因子为1.2，边界层为4层。最后，单击Apply按钮即绘制完边界层网格。划分好的边界层如图2-61所示。

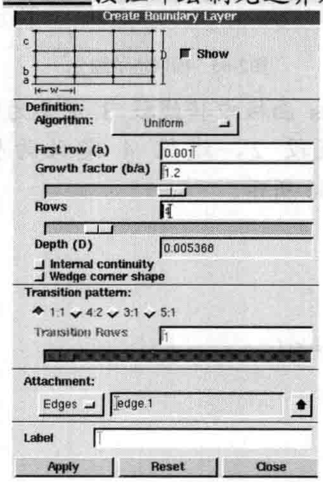


图2-60 Create Boundary Layer面板

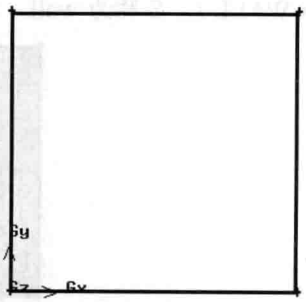


图2-61 边界层的划分

2. 单击→→按钮，弹出 Mesh Edges 面板，如图 2-62 所示。在 Edges 右侧的黄色输入栏中选中线段 1、线段 2、线段 3、线段 4，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval Size 分段方式，在左侧输入 0.005，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格，如图 2-63 所示。

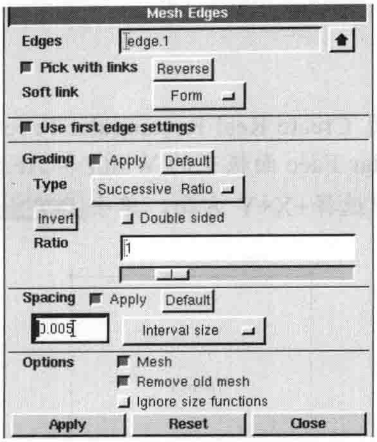


图2-62　Mesh Edges 面板



图2-63　绘制好的线网格

3. 单击→→按钮，打开 Mesh Faces 面板，如图 2-64 所示。选中已经完成线网格划分的面 1，运用 Quad 单元与 Map 方法对其进行划分，其他设置保持默认，其生成的面网格如图 2-65 所示。

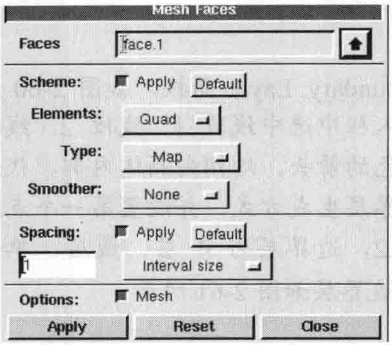


图2-64　Mesh Faces 面板

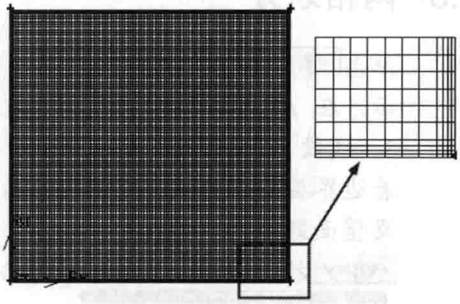


图2-65　面网格的划分

4. 单击→按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将线段 3 定义为壁面（WALL），名称为 top-wall；将线段 1、线段 2、线段 4 定义为壁面（WALL），名称为 wall，定义好的边界如图 2-66 所示。

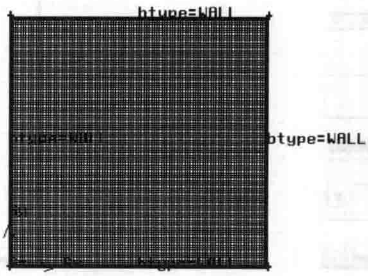


图2-66　定义好的边界类型

5. 选择 File→Save As 命令，将工程文件保存为“2-5”。同时，选择 Export→Mesh 命令，输出网格文件 2-5.msh。

2.5.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的图 2-67 所示的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。

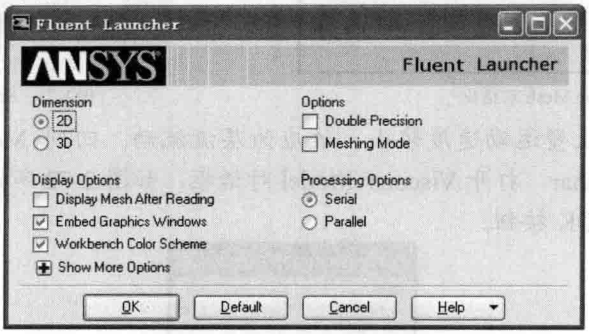


图2-67　Fluent Launcher 窗口

2. 选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 2-5.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 14.5 中，网格加载如图 2-68 所示。在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，于中间 General 控制面板中单击 按钮，如图 2-69 所示。检查网格的信息，直到文本窗口中最后一行出现“Done”语句。

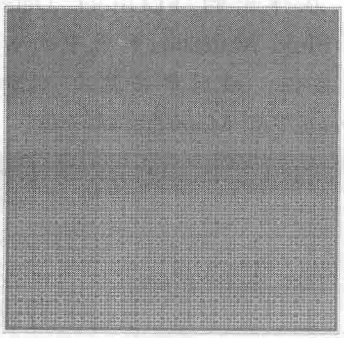


图2-68　网格

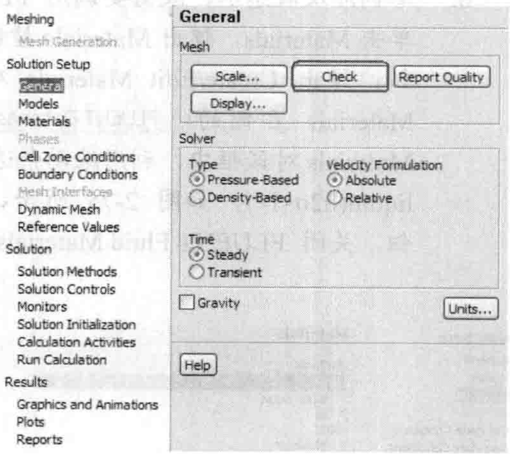


图2-69　检查网格

3. 单击 Solution Setup 的 General 中的 Scale 选项，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 2-70 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。
4. 保持 Solution Setup 的 General 中的 Solver 下方选项为默认，如图 2-71 所示，单击 OK 按钮。

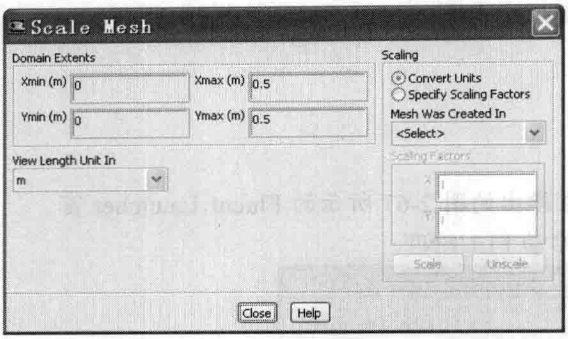


图2-70 Scale Mesh 对话框

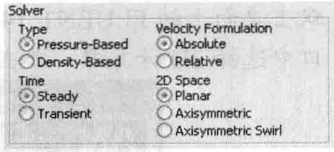


图2-71 Solver 对话框

5. 本例的箱体上壁运动速度较小，故应为层流流动。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，打开 Viscous Model 对话框，如图 2-72 所示，所有选项保持默认，单击 OK 按钮。

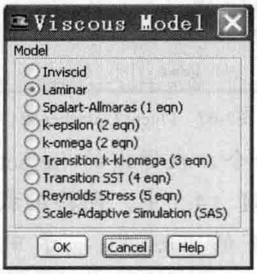


图2-72 Viscous Model 对话框

6. 本例涉及液态水，故需要调用 FLUENT 自带的材料数据库。在左侧控制树中单击 Materials，弹出 Materials 控制面板，如图 2-73 所示。单击 Create/Edit... 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，如图 2-74 所示。单击 Create/Edit Materials 右侧的 FLUENT Database... 按钮，在弹出的 FLUENT Datebase Materials 对话框中，利用滚动条选择 FLUENT Fluid Materials 列表中的 water-liquid(h2o<l>)，如图 2-75 所示，单击 Copy 按钮。最后单击两次 Close 按钮，关闭 FLUENT Fluid Materials 对话框与 Create/Edit Materials 对话框。

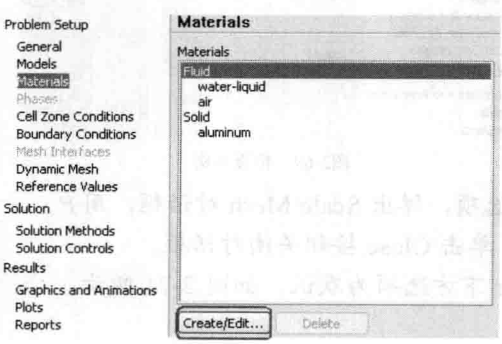


图2-73 Materials 控制面板

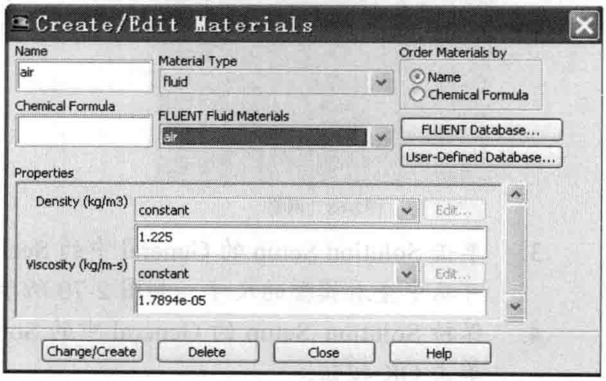


图2-74 Create/Edit Materials 对话框

7. 选择 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框，

如图 2-76 所示，所有选项保持默认设置，单击 OK 按钮。

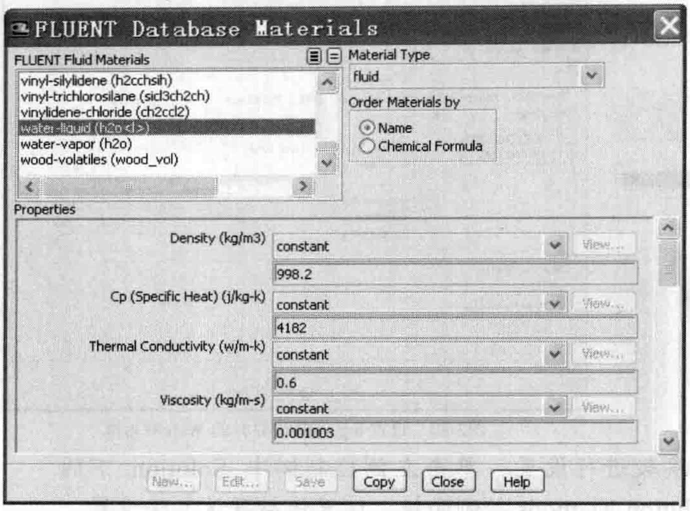


图2-75 FLUENT Database Materials 对话框

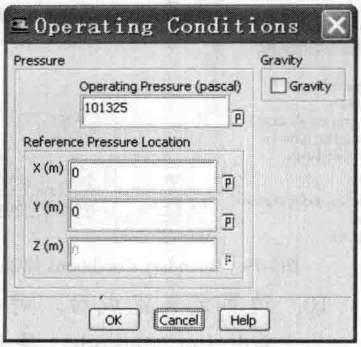


图2-76 Operating Conditions 对话框

8. 接下来定义本例的区域条件。单击左侧 Problem Setup 树中的 Cell Zone Conditions，打开 Cell Zone Conditions 控制面板，如图 2-77 所示。单击 Edit... 按钮，在弹出的 Fluid 对话框的 Material Name 右侧的下拉列表中选择 water-liquid 选项，如图 2-78 所示，保持其他选项不变，单击 OK 按钮。

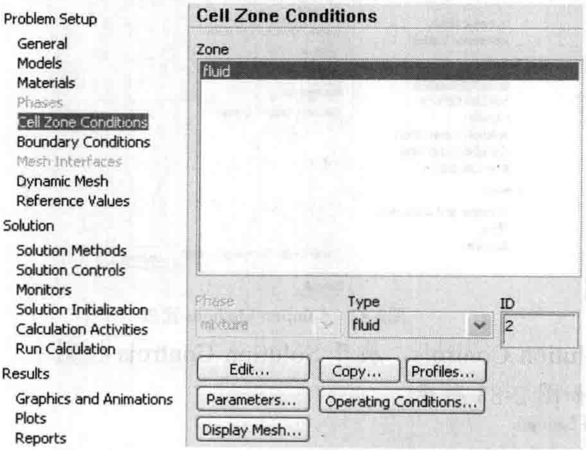


图2-77 Cell Zone Conditions 控制面板

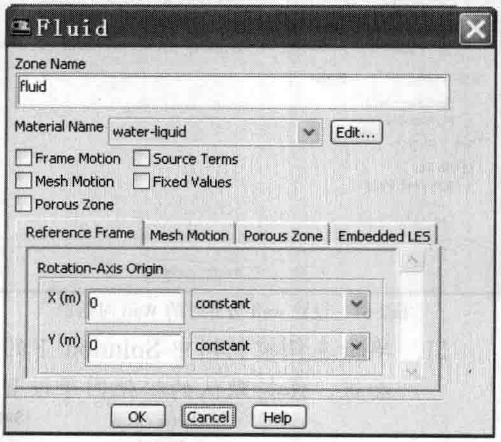


图2-78 Fluid 对话框

9. 单击左侧 Problem Setup 树中的 Boundary Conditions，打开 Boundary Conditions 控制面板，如图 2-79 所示。在 Zone 区域中选择 top-wall，其 Type 类型为 WALL，单击 Edit... 按钮，在弹出的 Wall 对话框下的 Wall Motion 选项中选中 Moving Wall 单选按钮，在右侧弹出的 Motion 选项下的 Speed（m/s）中输入 0.01，其他选项保持默认，如图 2-80 所示，单击 OK 按钮。在 Zone 区域中选择 wall，其 Type 类型为 WALL，单击 Edit... 按钮，所有选项保持默认值，如图 2-81 所示，单击 OK 按钮。

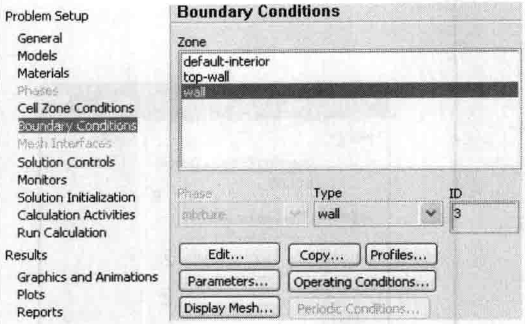


图2-79 Boundary Conditions 控制面板

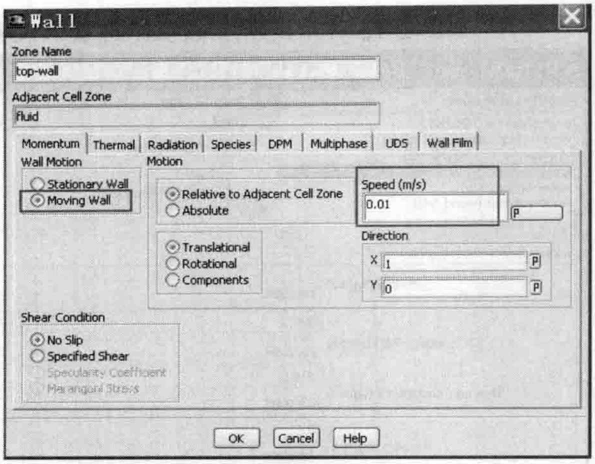


图2-80 设置 top-wall 边界时的 Wall 对话框

10. 边界定义完成后，对求解参数进行设置。单击左侧控制树中 Solution 下的 Solution Methods，展开 Solution Methods 控制面板，这里保持默认算法设置，如图 2-82 所示。

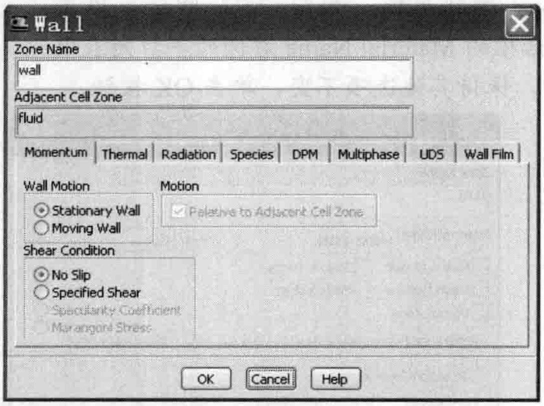


图2-81 设置 wall 边界时的 Wall 对话框

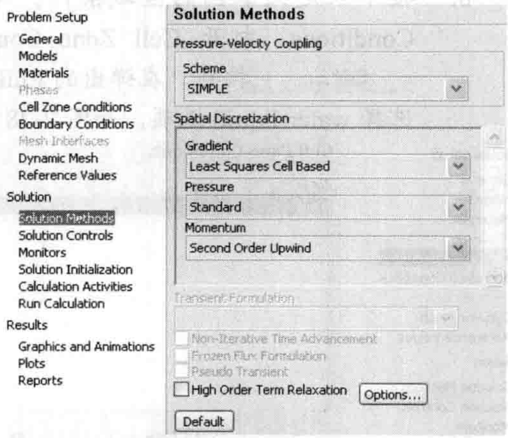


图2-82 Solution Methods 面板

11. 单击左侧控制树中 Solution 下的 Solution Controls，展开 Solution Controls 控制面板，保持默认的松弛因子设置，如图 2-83 所示。

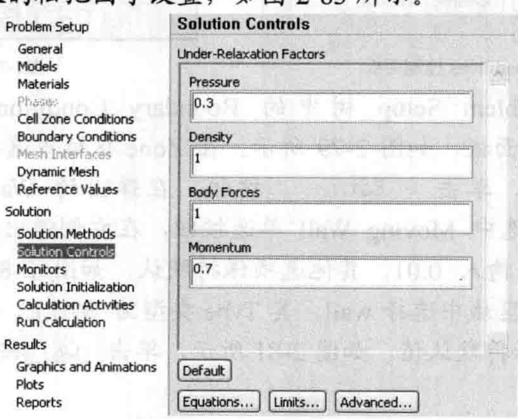


图2-83 Solution Controls 面板

12. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，如图 2-84 所示，选择 Initialization Methods 为 Hybrid Initialization，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

13. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的“Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框，如图 2-85 所示。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot 复选框，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。

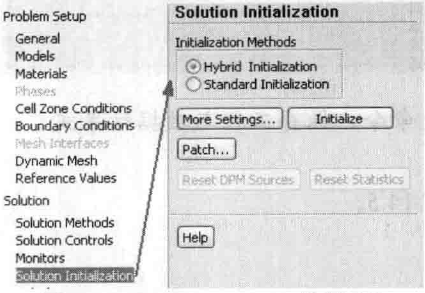


图2-84 Solution Initialization 控制面板

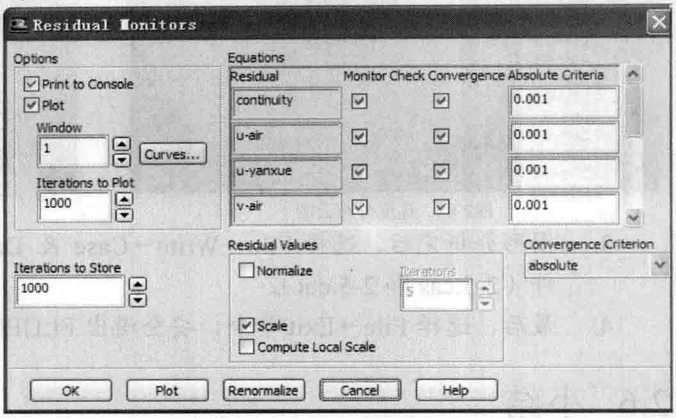


图2-85 Residual Monitors 对话框

14. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 开始解算。迭代至 897 步时，问题收敛。

2.5.5 结果后处理与分析

1. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，如图 2-86 所示，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 2-87 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity 选项，选中 Options 下方的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，得到图 2-88 所示的速度分布云图。

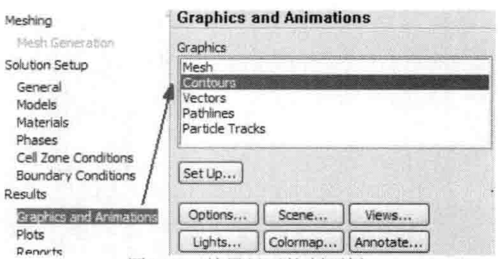


图2-86 结果显示控制面板

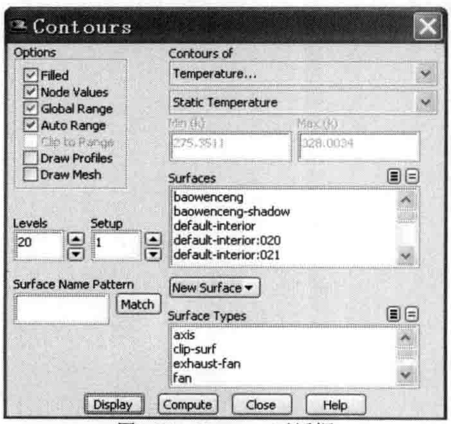


图2-87 Contours 对话框

2. 在 Graphics and Animations 控制面板中双击 Vectors，选中 Options 下方的 Global Range 复选框，单击 Display 按钮，得到图 2-89 所示的矢量图。

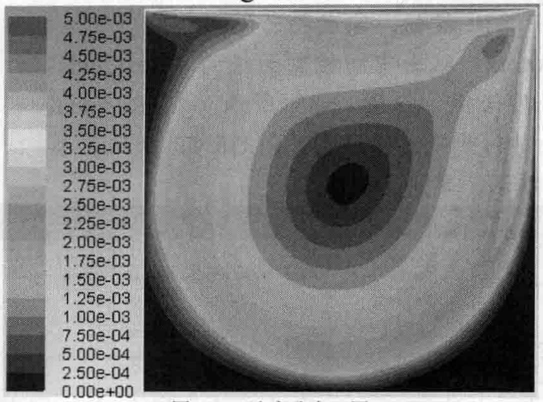


图2-88　速度分布云图

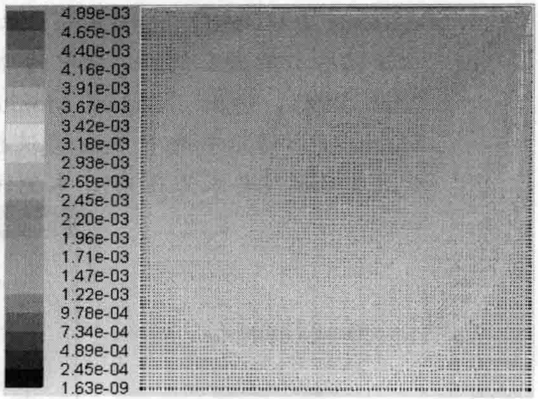


图2-89　矢量图

3. 图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（2-5.cas 和 2-5.dat）。

4. 最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

2.6 小结

本章主要介绍了 FLUENT 14.5 软件的基本特性、新功能、界面、运行方法等，并列举了一个基础实例。通过基础实例的介绍，帮助读者认识 FLUENT 14.5 的操作界面，了解 FLUENT 的求解过程，为后续利用 FLUENT 解决实际工程问题打下基础。

第3章 模拟计算前处理

前处理器（preprocessor）主要完成模拟对象的几何模型建立与网格划分。目前可用于 FLUENT 前处理生成网格的软件有 Gambit、ICEM CFD 等。在实际的仿真工作中，大约有 80%的时间用于划分网格，网格生成的效率直接影响工作的效率。因此，本章将详细介绍常用的前处理软件 Gambit 和 ICEM CFD 的基本功能和操作方法，从而帮助读者了解 Gambit 与 ICEM CFD 的实际操作流程，以提高网格划分的效率。

本章内容

- Gambit 的基本功能和基本用法。
- ANSYS ICEM CFD 的基本功能和基本用法。
- Gambit 和 ANSYS ICEM CFD 的实例操作。

本章案例

- 实例 1：偏心圆环的模型及网格划分。
- 实例 2：弯管肘的平面模型及网格划分。

3.1 Gambit 2.4.6 的应用

随着 CFD 技术应用的不断深入，CFD 能够模拟的工程问题也越来越复杂，因此对 CFD 前处理软件的要求也越来越高，在前处理器处理真实几何外形的同时，要能高效地生成满足 CFD 计算精度的网格。Gambit 就是 FLUENT 公司根据 CFD 计算的特殊要求而开发的专业的 CFD 前处理软件。但遗憾的是，自从 FLUENT 被收购后，Gambit 便不再有更新的版本推出，其最后的版本为 Gambit 2.4.6。

3.1.1 Gambit 2.4.6 基本界面

一、主界面

如图 3-1 所示，Gambit 的用户界面可分为 7 个部分，分别为菜单栏、视图窗口、操作工具面板、命令显示窗、命令解释窗、命令输入栏和视图控制面板。Gambit 中可以显示 4 个视图，以便于建立三维模型，同时也可以只显示一个视图。

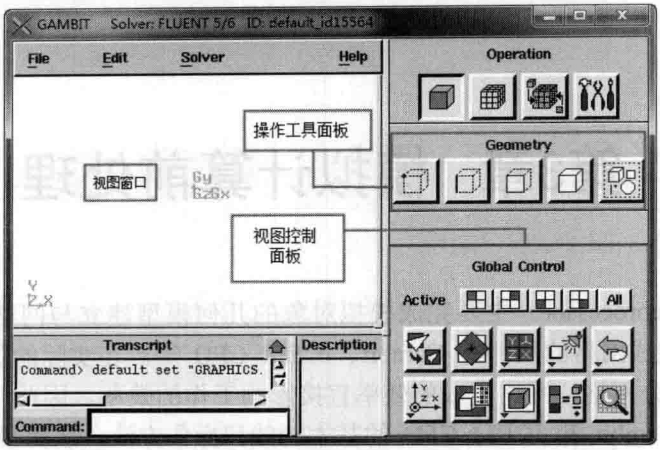


图3-1 Gambit 操作界面

二、视图控制面板

Gambit 的视图控制面板如图 3-2 所示。

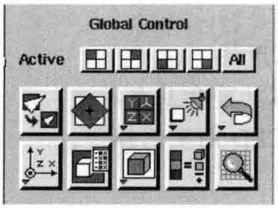


图3-2 视图控制面板

视图控制面板中常用的命令如下。

- 全图显示：缩放图形的显示范围，使图形整体显示于当前窗口。
- 选择显示视图：使用上一次的菜单及窗口配置更新当前显示。
- 选择视图坐标：为模型显示确定方位坐标。
- 选择显示项目：指定模型是否可见等属性。
- 线框方式：指定模型显示的外观，包括线框方式、渲染方式和消隐方式等。

三、操作工具面板

操作工具面板位于 Gambit 操作界面的右上角，其中四个部分对应的按钮说明如图 3-3 所示。它们分别对应几何模型建立、网格划分、边界类型与区域流体介质类型定义、控制工具。

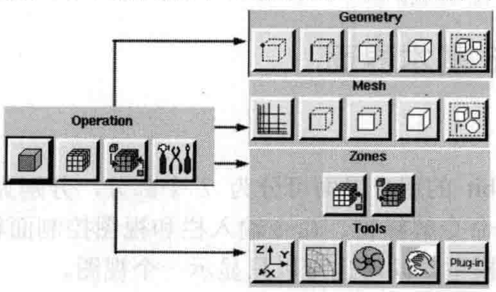


图3-3 操作工具面板

四、命令显示窗与命令输入栏

命令显示窗与命令输入栏位于 Gambit 操作界面的左下方，如图 3-4 所示。命令显示窗中记录了每一步操作的命令和结果，可以在命令输入栏中直接输入命令，其效果和单击命令按钮一样。

五、命令解释窗

当鼠标移到操作工具面板中的任意一个按钮上时，命令解释窗（Description 窗口）中会出现对该命令的解释，如图 3-5 所示。

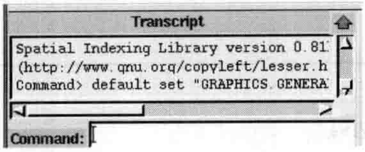


图3-4　命令显示窗和命令输入栏

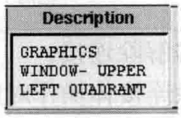


图3-5　命令解释窗

3.1.2　Gambit 2.4.6 几何建模

Gambit 软件包含了一整套易于使用的工具，可以快速地建立几何模型。另外，Gambit 软件在读入其他 CAD/CAE 网格数据时，可以自动完成几何清理（即消除重合的点、线、面）和进行几何修正。

一、Gambit 的通用几何编辑工具

(1)　移动/复制和排列。

当要复制或移动一个对象（点、线、面或体）时，首先选择需要复制或移动的对象，在操作工具面板中单击输入栏，输入栏黄色高亮显示，表明可以选择需要的对象。相关操作说明如表 3-1 所示。

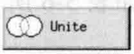
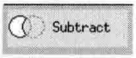
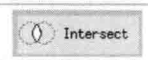
表 3-1　移动/复制和排列操作

按钮	功能
	将所选择的几何体移动或复制到新位置。共有 4 种方式：Translate（平移）、Scale（比例）、Reflect（镜像）、Rotate（旋转）
	重新排列对象

(2)　布尔运算。

典型的布尔运算包括并、交、减。布尔操作在绘制三维体时最为常用，其基本操作方法与复制一样，先选择对象再执行操作，这里就不再重复说明。其操作说明如表 3-2 所示。

表 3-2　布尔运算操作

按钮	功能
	取两个面或两个体的并集作为一个新的面或体
	从一个面或体上减去一个面或体，得到一个新的面或体
	取两个面或体的交集为新的面或体

(3) 分裂与合并。

线、面和体的分裂与合并的操作方法类似，这里只介绍体的分裂与合并。相关操作说明如表 3-3 所示。

表 3-3 分裂与合并操作

按钮	功能
Split Volume	用一个体将另一个体分离成两个体
Merge Volumes	把两个体合并为一个体

(4) 连接与解除连接。

连接与解除连接体操作对应的按钮说明如表 3-4 所示。

表 3-4 连接与解除操作

按钮	功能
Connect	把完全重合的点、线、面合并
Disconnect	解除合并连接状态

(5) 撤销、重复和删除。

撤销、重复与删除操作对应的按钮说明如表 3-5 所示。

表 3-5 撤销、重复和删除操作

按钮	功能
Undo	撤销上一条命令，在 Gambit 中的撤销操作没有级数限制
Redo	重新执行上一条命令
	用来删除一些误操作或不需要的对象，如点、线、面、体、网格

二、Gambit 的几何生成工具

一般按点、线、面、体的顺序来建立几何模型。

(1) 点的生成。

通过直接输入坐标值来建立几何点时，既可以使用笛卡儿坐标系，也可以使用柱坐标系，或者在一条曲线上生成点，并可以用这些点来断开曲线。

在 Gambit 中，点的创建方式有多种：根据坐标创建、在线上创建、在面上创建、在体上创建、在两条直线交叉处创建、在体的质心位置创建和通过投影的方式创建。用户可以根据不同的需要来选择不同的创建方式。各种创建点的方式对应按钮的功能说明如表 3-6 所示。

表 3-6　点的生成

按钮	功能
From Coordinates	根据坐标创建点
On Edge	在线上创建点
On Face	在面上创建点
On Volume	在体上创建点
At Intersections	在两条直线交叉处创建点
At Centroid	在体的质心位置创建点
Project	通过投影的方式创建点

(2)　线的生成。

Gambit 线生成按钮除了创建线外，还可以在线生成按钮上单击鼠标右键，从快捷菜单中选择其他的线段，例如圆弧、圆、倒角、椭圆等。各种线生成按钮的功能说明如表 3-7 所示。

表 3-7　线的生成

按钮	功能
Straight	创建直线
Arc	创建弧线
Circle	创建圆
Ellipse	创建椭圆
Conic	创建二次曲线
Fillet	创建带状线
NURBS	创建样条曲线
Sweep	创建扫描线
Revolve	创建螺旋线
Project	通过投影的方式创建线

(3)　面的生成。

要创建一个二维的几何模型，必须创建面，只有线和点是不可以的。面的创建十分简单，只需选择组成该面的相应线，然后单击 Apply 按钮即可。需要注意的是，构成面的这些线必须是闭合的。

用鼠标右键单击面生成按钮，在快捷菜单中选择相应的命令按钮生成面。为方便读者了解各按钮的功能，表 3-8 列出了可以生成面的各按钮功能。

表 3-8　面的生成

按钮	功能
Wireframe	通过线围成平面
Parallelogram	通过三点生成平行四边形的平面
Polygon	通过选择多个点生成多边形面
Circle	通过选择一个中心和两个等距半径点生成圆面
Ellipse	通过选择一个中心和两轴顶点生成椭圆面
Skin Surface	通过空间的一组曲线生成一个放样曲面
Net Surface	通过两组曲线生成一个曲面
Vertex Rows	通过空间的点生成一个曲面
Sweep Edges	根据给定的路径和轮廓曲线生成扫掠曲面
Revolve Edges	通过绕选定轴旋转一条曲线生成一个回转曲面

(4)　体的生成。

在 Gambit 软件中创建三维模型时，必须创建体。可以直接生成块体、柱体、锥体、圆环体、金字塔体等。生成体的各种按钮的功能说明如表 3-9 所示。

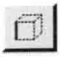
表 3-9　生成几何实体

按钮	功能
Stitch Faces	把现有曲面缝合为一个体
Sweep Faces	沿给定的路径扫掠形成一个体
Revolve Faces	将一个面围绕一个轴旋转生成回转体
Wireframe	在现有的拓扑结构上生成一个体

3.1.3　Gambit 2.4.6 网格划分

Gambit 软件提供了功能强大、灵活方便的网格划分工具，可以划分满足 CFD 特殊需要的网格。在操作工具面板中单击按钮，可以进入网格划分操作工具面板。在 Gambit 中，可以分别针对边界层、边、面、体和组划分网格。表 3-10 给出了 5 个按钮的含义。

表 3-10　网格生成

按钮	功能
	Boundary Layer（边界层）
	Edge（边）
	Face（面）
	Volume（体）
	Group（组）

一、线网格的生成

作为将在面上划分网格的网格种子，用户需详细地控制线上节点的分布规律。Gambit 提供了满足 CFD 计算特殊要求的 5 个预定义的节点分布规律。

二、面网格的生成

对于平面以及轴对称流动问题，只需要生成面网格。对于三维问题，也可以先划分面网格，再拓展到体。

映射网格划分技术是一种传统的网格划分技术，它仅仅适合于逻辑形状为四边形或三角形的面，而且允许用户详细控制网格的生成。在几何形状不太复杂的情况下，能够生成高质量的结构化网格。为了提高结构化网格的生成效率，Gambit 使用子映射网格划分技术。也就是说，当用户提供的几何外形过于复杂时，映射网格划分方法可以自动对几何对象进行再分割，能在原本不能生成结构化网格的几何实体上划分出结构化网格。对于拓扑形状较为复杂的面，也可以生成自由网格，用户可以选择合适的网格类型（三角形或者四边形）。

在 Gambit 软件的网格操作面板中，需要选择要划分网格的面单元，定义网格单元类型（Elements）、网格划分类别（Type）、光滑度（Smoother）以及网格步长（Spacing）等。此处主要说明网格单元类别和网格划分的适应类型，详见表 3-11 和表 3-12。

表 3-11　面网格划分类别

网格划分类别	说明
Map	创建四边形的结构性网格
Submap	将一个不规则的区域划分为几个规则区域，并分别划分结构性网格
Pave	创建非结构性网格
TriPrimitive	将一个三角形区域划分为三个四边形区域，并划分规则网格
WedgePrimitive	在一个楔形的尖端划分三角形网格，沿着楔形向外辐射，划分四边形网格

表 3-12　面网格划分的适用类型

面网格划分类别	适用类型		
	Quad	Tri	Quad/Tri
Map	√		√
Submap	√		
Pave	√	√	√
TriPrimitive	√		
WedgePrimitive			√

三、体网格的生成

单击 Mesh 面板的第四个按钮，将弹出体网格划分面板。与面网格划分面板类似，Mesh Volumes 面板中的 Elements 提供了三种体网格划分类型。体网格单元类别和网格划分的适应类型如表 3-13 和表 3-14 所示。

表 3-13　体网格划分类别

网格划分类别	说明
Hex	六面体网格形式
Hex/Wedge	主要以六面体网格形式，在适当位置包含楔形网格
Tet/Hybrid	主要以四面体网格形式，在适当位置包含六面体、锥形和楔形网格

表 3-14　体体网格划分适用类型

网格划分类别	适用类型		
	Hex	Hex/Wedge	Tet/Hybrid
Map	√		
Submap	√		
Tet Primitive	√		
Cooper	√	√	
TGrid			√
Stairstep	√		

四、边界层网格的生成

CFD 对计算网格有特殊的要求，一是考虑到近壁黏性效应采用较密的贴体网格，二是网格的疏密程度与流场参数的变化梯度大体一致。

对于面网格，可以设置平行于给定边界层网格，可以指定第二层与第一层之间的间距以及总层数。

对于体网格，也可以设置垂直于壁面方向的边界层，从而可以划分出高质量的贴体网格。

边界层网格的创建需要输入 4 组参数中的 3 组，分别是第一个网格点距边界的距离（First Row）、网格的比例因子（Growth Factor）、边界层网格点数（Rows，垂直边界方

向）以及边界层厚度（Depth）。

3.1.4 Gambit 2.4.6 基础实例演示

偏心圆环在管道、井筒、往复泵、轴承中经常出现。流体在偏心圆环中会呈现怎样的流动状态，其速度、压强、温度分布如何，这些都是设计管道、泵、轴承结构与尺寸的关键参数。而仿真计算前，需要建立偏心圆环的模型及划分网格，因此，这里我们首先介绍利用 Gambit 进行二维偏心圆环模拟的前处理过程。

【案例简介】

本例建立的偏心圆环尺寸如图 3-6 所示，外圆半径 311mm，内圆半径 127mm，偏心距 2mm。

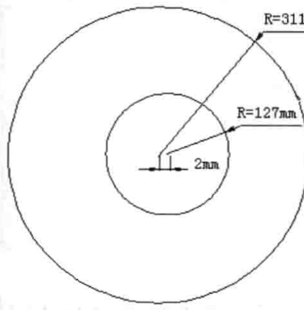


图3-6　偏心圆几何尺寸

【思路分析】

偏心圆环由大小两圆构成，可先以同一圆心绘制出半径大小不一的两个圆，然后利用移动命令将内圆向右移动 2mm（偏心距），再利用布尔减命令，将大圆减去小圆，得到我们的几何模型。几何模型建立好之后，采用结构网格（四边形）进行网格划分，在两圆间建立径向辅助线，对辅助线、圆弧分别进行线网格划分。这里需要注意，内外圆弧的线网格段数应对应相等。线网格划分好后，即可生成面网格。最后，定义圆环的边界类型。模型建立及网格划分流程如图 3-7 所示。

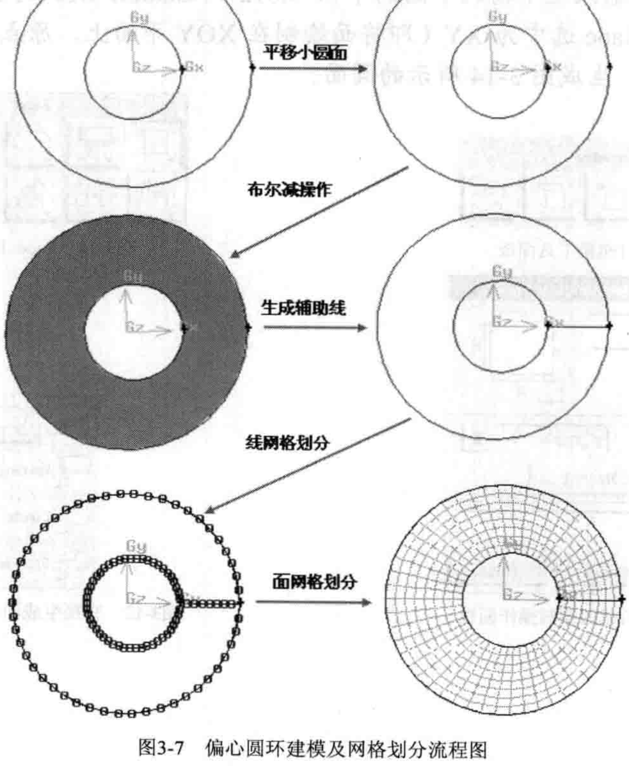


图3-7　偏心圆环建模及网格划分流程图

第3章 模拟计算前处理

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch3\3-1.msh”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch3\3-1.avi”文件。

1. 选择 File→New 命令，弹出 Create New Session 对话框，如图 3-8 所示。在 ID 和 Title 文本框中输入“3-1”，取消选中 Save current session 复选框（若选中，其左侧按钮将显示为红色），单击 Accept 按钮。

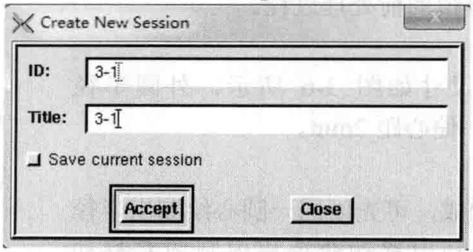


图3-8　Create New Session 对话框

2. 单击操作面板中的 按钮，弹开几何建模工具面板，如图 3-9 所示。单击几何建模工具面板中的 按钮，弹开 Face 工具面板，见图 3-10 所示。单击 Face 工具面板上排第二个按钮，默认弹出矩形面域的绘制操作面板，如图 3-11 所示。右击 按钮，弹出图 3-12 所示的下拉列表。选中第二个 Circle，弹出图 3-13 所示的圆面生成操作面板。在圆面生成操作面板的 Radius 文本输入框中输入小圆的半径 0.0127（Gambit 默认的绘制长度单位为 m），保持 Plane 选中为 XY（即将面绘制在 XOY 平面上，原点为圆心），单击 Apply 按钮，生成图 3-14 所示的圆面。

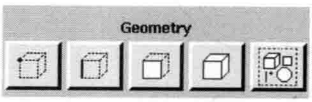


图3-9　几何建模工具面板

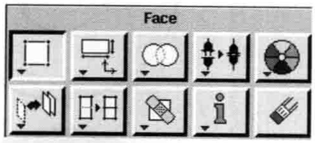


图3-10　Face 工具面板

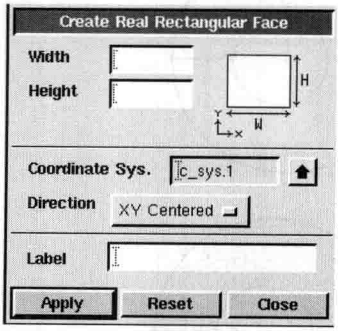


图3-11　矩形面域的绘制操作面板

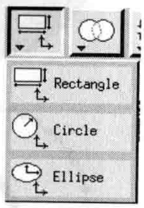


图3-12　直接生成面域的下拉列表

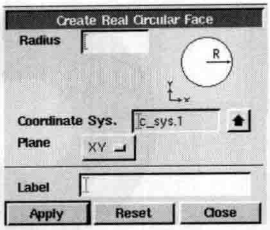


图3-13 圆面生成操作面板

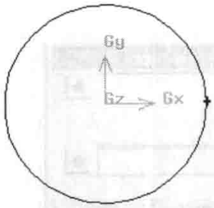


图3-14 生成小圆圆面

3. 按照同样的方法，在圆面生成操作面板的 Radius 文本输入框中输入大圆的半径 0.0311，单击 Apply 按钮，此时视图窗口如图 3-15 所示。

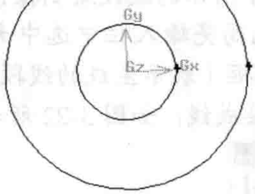


图3-15 生成大圆圆面

4. 单击 Face 工具面板第二排的第一个按钮，弹出图 3-16 所示的移动/复制面操作面板。单击该面板的 Faces 右侧的黄色高亮输入框，利用 Shift+左键选中小圆面，保持 Move 选项被选中（即进行移动操作），Operation 选择为 Translate（即表示以坐标轴方向移动），在 Global 下方的 X 文本输入框中输入 0.002，单击 Apply 按钮。此时视图窗口即呈现出偏心的两个圆面，如图 3-17 所示。

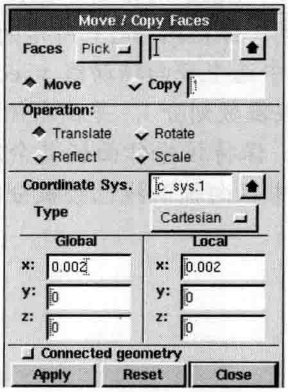


图3-16 移动/复制操作面板

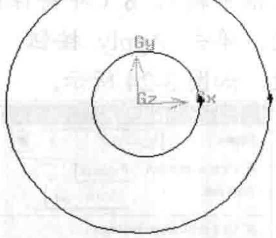


图3-17 偏心的两个圆面

5. 单击 Face 工具面板第一排的第三个按钮，并右击，在弹出的下拉列表中选择布尔减按钮 Subtract，弹出的布尔减操作面板如图 3-18 所示。在该面板中选择第一行 Face 为大圆面，选择第二行 Faces 为小圆面，单击 Apply 按钮。

6. 此时，视图窗口中并未看到有何变化，我们可以单击控制面板下方的视图控制面板，选择最下面一排的第三个按钮，如图 3-19 所示。此时发现视图窗口呈现出渲染的面域，如图 3-20 所示，这正是我们所要的偏心圆环的计算区域。

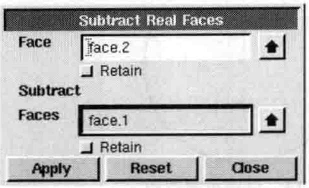


图3-18　布尔减操作控制面板

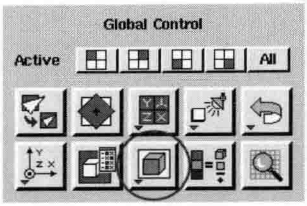


图3-19　视图控制面板

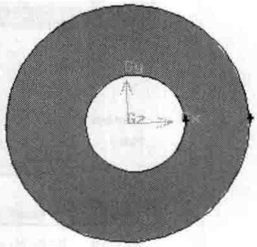


图3-20　偏心圆环计算区域

7. 到此为止，我们已经完成了几何模型的建立，下面开始进行网格划分。为了能够划分为结构网格，需要添设径向辅助线。单击 Edge 工具面板第一排的第一个按钮，弹出图 3-21 所示的线段绘制操作面板。在 Create Straight Edge 操作面板的 Vertices 黄色高亮输入栏中选中大小圆 X 轴上的径向点，选中 Type 右侧的 Virtual 复选框（表示生成的线段类型为虚线——辅助线），单击 Apply 按钮，将这两点连接成线，如图 3-22 所示。

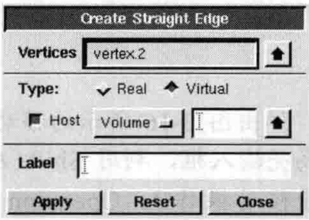


图3-21　线段绘制操作面板

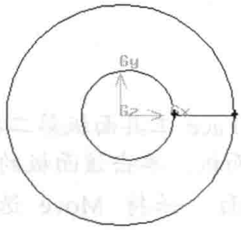


图3-22　径向辅助线

8. 单击操作面板的按钮，进行网格划分。此时展开 Mesh 操作面板，单击线网格划分按钮，继续展开其下一级操作面板——Edge 网格划分操作面板。单击线网格划分操作面板第一行的第一个按钮，弹出图 3-23 所示的 Mesh Edges 操作面板，在 Edges 右侧黄色高亮输入栏中选中径向辅助线 v_edge.4，选择下方 Spacing 右侧的 Interval count（表示按段数划分），并在左侧文本输入框中输入 8（即将径向辅助线划分为 8 段），保持该操作面板其余默认设置，单击 Apply 按钮。此时可以看到视图窗口中径向辅助线已经被分割成 8 段，如图 3-24 所示。

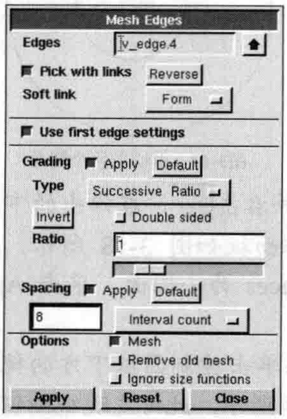


图3-23　Mesh Edges 操作面板

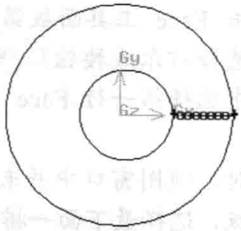


图3-24　径向辅助线网格

9. 按照同样的方法将大小圆均分割成 50 段，在 Edges 右侧黄色高亮输入栏中选中两个圆环线段，选择 Interval count 并在左侧文本输入框中输入 50，生成图 3-25 所示的线网格。

10. 将计算区域用径向辅助线分割，单击 Face 操作面板第二排第二个按钮，弹出图 3-26 所示的面分割面板。在 Split Face 面板的第一行 Face 右侧黄色高亮输入栏中选中计算区域，选择 Split with 为 Edges(Virtual)（即用虚线来分割面），然后在 Edges 右侧的黄色高亮输入栏中选中径向辅助线，单击 Apply 按钮，即完成了分割的操作。

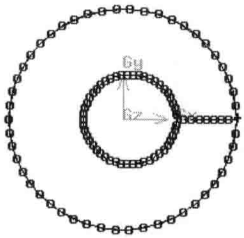


图3-25 圆环的网格

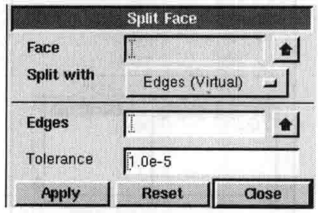


图3-26 面分割面板

11. 单击 Face 网格划分操作面板的第一行第一个按钮，弹出图 3-27 所示的面网格生成面板。选中计算区域面，保持面板中所有的默认设置，单击 Apply 按钮，得到本例的计算网格，如图 3-28 所示。

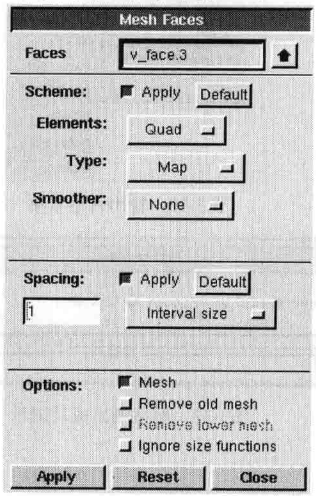


图3-27 面网格生成面板

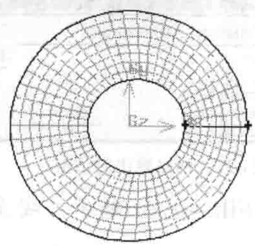


图3-28 计算网格

12. 计算网格最后还需要进行边界类型的定义。单击操作面板的第三个按钮，展开 Zones 操作面板。面板中有两个按钮，分别对应了边界类型定义和介质类型定义。由于本例只涉及一个计算区域，不需要进行介质类型的定义。单击边界类型定义按钮，弹出图 3-29 所示的 Specify Boundary Types 面板，在 Name 右侧的文本输入栏中输入要定义边界的名称，如“neibi”（内壁——小圆壁面），选择其 Type 为 WALL（壁面边界类型），选择 Edges 为小圆环对应的线段（edge.3），单击 Apply 按钮。同样，将大圆环的边界类型也定义为 WALL，名称为“waibi”。

13. 模型、网格、边界类型定义都完成之后，需要将网格文件输出。选择 File→Export→Mesh 命令，如图 3-30 所示，弹出图 3-31 所示的网格输出对话框。保持 File Name 为 3-1.msh（后缀名 msh 表示为网格文件），选中 Export 2-D(X-Y) Mesh 复选框，使其红色高亮显示，意味着输出的网格文件是一个二维的网格。最后单击 Accept 按钮，直到文本显示框 Transcript 最后一行出现 “Mesh was successfully written to 3-1.mesh.” 语句，如图 3-32 所示，表示网格文件输出成功。

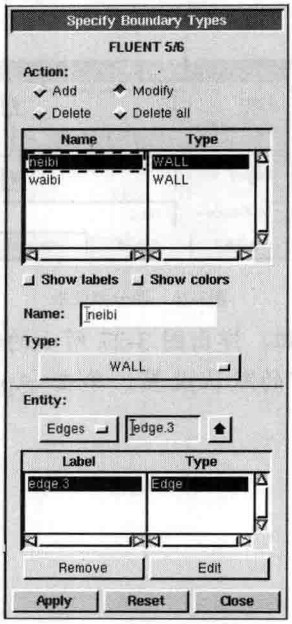


图3-29　边界类型定义面板

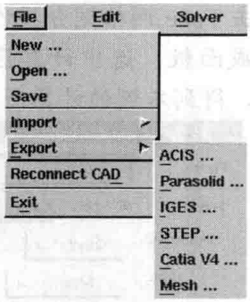


图3-30　输出网格菜单

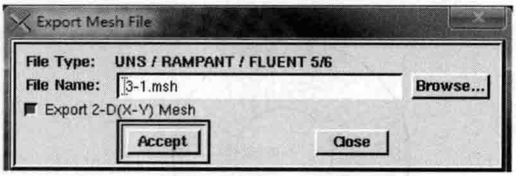


图3-31　网格输出对话框

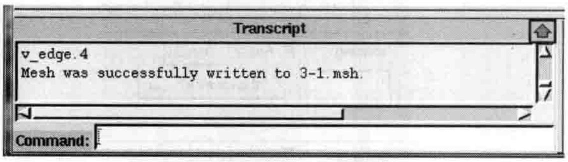


图3-32　网格输出成功提示

14. 选择 File→Exit 命令，安全退出 Gambit。

3.2 ICEM CFD 14.5 的应用

与众多的前处理软件相比，ANSYS ICEM CFD 在结构化网格划分方面有着巨大的优势，其强大的结构化网格划分功能使其在 CFD 前处理过程中得到了极其广泛的应用。本节将介绍 ANSYS ICEM CFD 14.5 的基本特点和用法。

3.2.1 ICEM CFD 14.5 基本界面

ICEM CFD 14.5 的基本界面如图 3-33 所示。

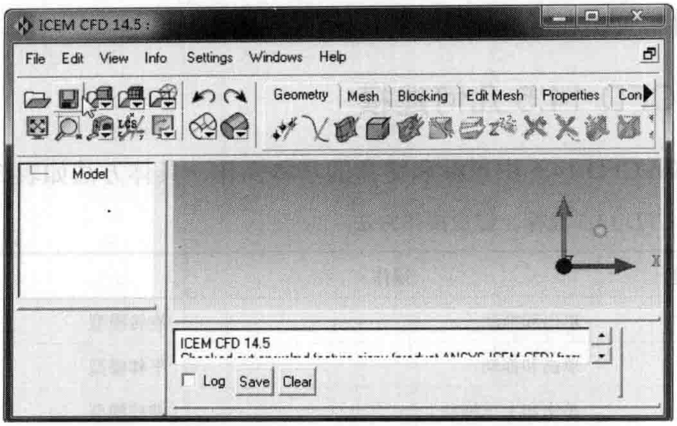


图3-33　ANSYS ICEM CFD 14.5 的操作界面

一、ICEM CFD 14.5 菜单

在图形显示区的左上角有一串功能菜单（Manager），主要包括网格项目管理、设置和文件输入输出等，下面简单说明这些基本菜单。

- File：文件菜单提供许多与文件管理相关的功能，如打开文件、保存文件、合并和输入几何模型、存档工程，这些功能方便了管理 ICEM CFD 14.5 工程。
- Edit：编辑菜单包括回退、前进、命令行、网格转化为小面结构、小面结构转化为网格、结构化模型面。
- View：视图菜单包括合适窗口、放大、俯视、仰视、左视、右视、前视、后视、等角视、视图控制、保存视图、背景设置、镜像与复制、注释、加标记、清除标记、网格界面剖视。
- Info：信息菜单包括几何信息、面的面积、最大截面积、曲线长度、网格信息、单元体信息、节点信息、位置、距离、角度、变量、分区文件等。
- Settings：设置菜单包括常规、求解、显示、选择、内存、远程、速度、重启、网格划分等。
- Help：帮助菜单包括启动帮助、启动用户指南、启动使用手册、启动安装指南、有关法律。

二、模型树

模型树位于操作界面左侧，通过几何实体、单元类型和用户定义的子集控制图形显示。

因为有些功能只对显示的实体发生作用，所以模型树在孤立需要修改的特殊实体时体现出了它的重要性。用鼠标右键单击各个项目可以方便地进行相应的设置，例如颜色的标记和用户定义显示等。

三、消息窗口

消息窗口显示 ICEM CFD 提示的所有信息，使用户了解内部过程。窗口显示操作界面和几何、网格功能的联系。在操作过程中时刻注意消息窗口是很重要的，它将告诉用户各种状态。

保存命令将所有窗口内容写入一个文件，文件路径默认在工程打开的地方。日志选择按

钮处于选中状态时将只保存用户特定的消息。

3.2.2 ICEM CFD 14.5 几何建模

首先介绍 ICEM CFD 14.5 中鼠标和键盘的基本操作，具体方法如表 3-15 所示。

表 3-15 ICEM CFD 14.5 鼠标、键盘操作方法

鼠标或键盘按键	操作	功能
鼠标左键	单击和拖动	旋转模型
鼠标中键	单击和拖动	平移模型
鼠标右键	单击和上下拖动	缩放模型
鼠标右键	单击和左右拖动	绕屏幕 Z 轴旋转模型
F9	按住 F9 键，然后单击任意鼠标键	操作时进行模型运动

一、点的生成

通过单击 Geometry 标签，选择按钮，在屏幕左下角出现点的创建按钮。可使用不同的方法创建点，如图 3-34 所示。

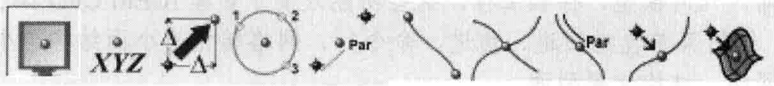


图3-34 ICEM CFD 14.5 点的创建

二、线的生成

通过单击 Geometry 标签，选择按钮，在屏幕左下角出现线的创建按钮。可使用不同的方法创建线，如图 3-35 所示。

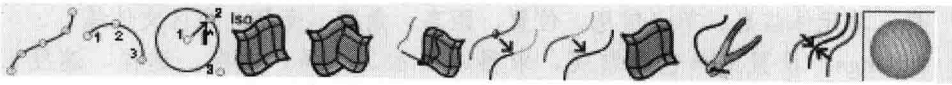


图3-35 ICEM CFD 14.5 线的创建

三、面的生成

通过单击 Geometry 标签，选择按钮，在屏幕左下角出现面的创建按钮。可使用不同的方法创建面，如图 3-36 所示。

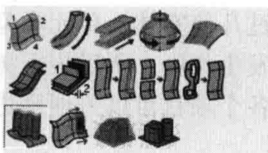


图3-36 ICEM CFD 14.5 面的创建

3.2.3 ICEM CFD 14.5 网格划分

ICEM CFD 14.5 的网格划分功能非常强大，不但能进行非结构化网格的划分，还能够进行结构化网格的划分。划分结构化网格是 ICEM CFD 14.5 的强项，也是用户使用此软件的

主要目的。下面主要介绍一下怎么使用 ICEM CFD 14.5 进行结构化网格划分。

如果计算模型比较简单，可以直接使用 ICEM CFD 14.5 的工具来建立几何模型，但是 ICEM CFD 14.5 的建模功能不够强大，一般其模型需要在 CAD 或者其他软件中建立再导入进来。下面假设已经在其他软件中建立好模型，介绍怎么将模型导入并利用 ICEM CFD 14.5 进行结构化网格的划分。

一、导入几何体

选择 File→Geometry→Open Geometry 命令，选择好文件后，在出现的对话框中进行相应的设置，即可将几何文件导入。在这里还可以将其他类型的文件导入，如 msh 文件等。导入之后就可以进行相关操作了。

二、几何操作

一般导入的几何体是非常粗糙的，需要在 ICEM CFD 14.5 中进行相应的修改，不过这里建议在 CAD 等其他软件中将几何模型尽量简化。图 3-37 为在对几何体进行操作时经常用到的一些工具。

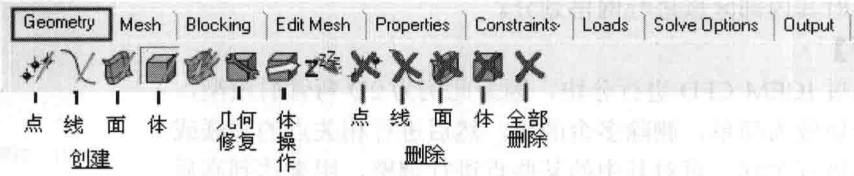


图3-37　Geometry 工具栏

利用这些工具可对导入进来的几何体进行相关的几何操作，以得到想要的拓扑结构。只有得到很好的拓扑结构，才能更好地进行后续的操作。

三、建立拓扑结构并与几何模型关联

在处理好几何体后，接下来就要建立几何模型的拓扑结构。建立的方法是单击 Blocking 标签，所涉及的工具说明如图 3-38 所示。

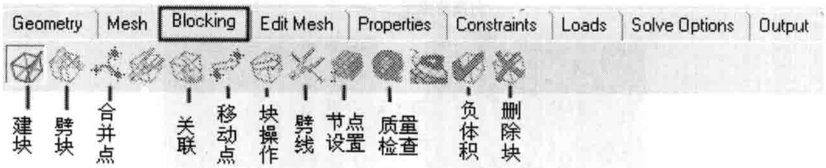


图3-38　Blocking 工具栏

通过这些工具可以创建几何模型的拓扑结构，以及与几何模型对应的边和点。

四、划分网格工具

在建立几何模型的拓扑结构之后，接下来就是设置网格划分参数。单击 Mesh 标签，设置网格参数，如图3-39 所示。可以根据几何线的长度以及流场的情况来设置网格划分参数。

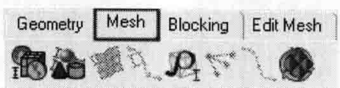


图3-39　Mesh 工具栏

五、设置求解器

在完成网格划分以后，需要设置求解器，并输出为相应格式进行保存，如图 3-40 所示。

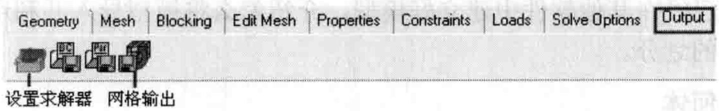


图3-40 选择求解器并输出工具栏

3.2.4 ICEM CFD 14.5 基础实例演示

下面介绍一个用 ICEM CFD 划分网格的实例，让读者对 ICEM CFD 14.5 的功能有更好的了解。若想对 ICEM CFD 进行进一步的学习，可以参看 ICEM CFD 14.5 的帮助文件。

【案例简介】

图 3-41 是一个弯管肘的平面模型，为了模拟其内部流体流动情况，需要对其内部区域进行网格划分。

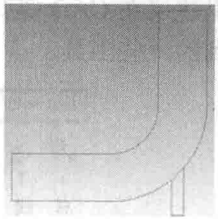


图3-41 弯管肘的平面模型

【思路分析】

首先通过 ICEM CFD 进行分块，因为此例为 2D 弯管肘模型，所以对其分块较为简单，删除多余的块，然后进行相关点的关联或者对某些线进行关联，再对其中的某些点进行调整，用来达到高质量的网格。

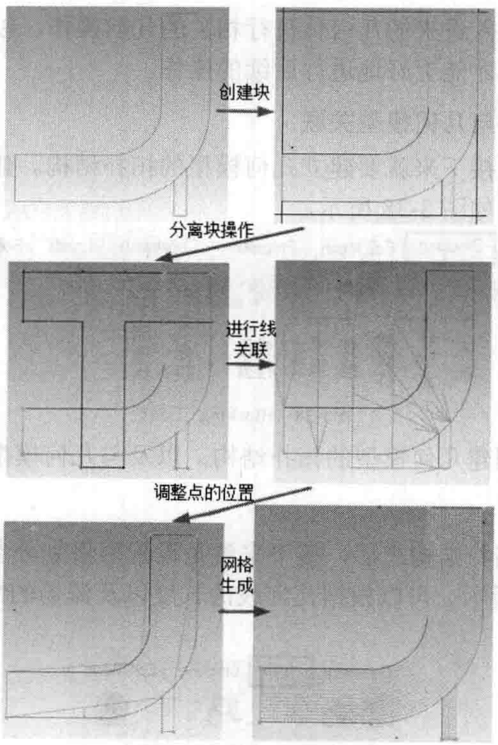


图3-42 弯管肘的网格划分流程

起始文件——参见附带光盘中的“START\Ch3\3-2.tin”文件。

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch3\3-2.msh”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch3\3-2.avi”文件。

1. 首先将几何文件 tin 复制到工作目录中，然后选择 File→Open Geometry 命令，选择文件 3-2.tin，单击 Accept 按钮，即可将 3-2.tin 中的图形读入到 ICEM CFD 14.5 中。
2. 创建块。选择 Blocking→Create Block→Initialize Block，打开创建块面板，如图 3-43 所示。选择类型为 2D Planar，其余默认，单击 Apply 按钮，创建初始的块。初始的块如图 3-44 所示。

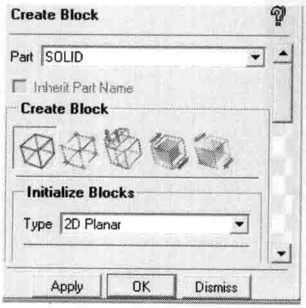
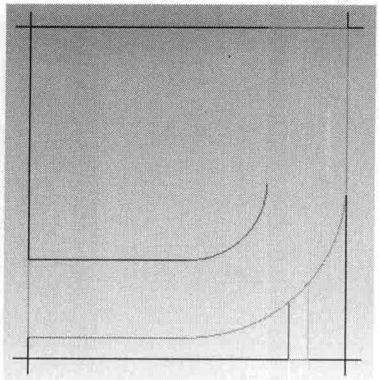
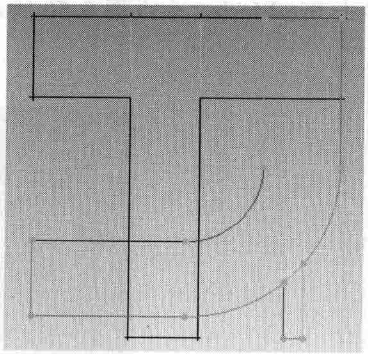


图3-43　创建块面板


图3-44　初始的块

3. 选择 Blocking→Split Block→Split Block，进行块的分离操作，添加一横两竖三根辅助线将面分离成 6 块，并将左下角和右下角两个块删除，分离后的模型如图 3-45 所示。


图3-45　分块后的模型

4. 选择 Blocking→Associate→Associate Edge to curve，将会显示一个选择面板，如图 3-46 所示。进行线的关联，关联的结果如图 3-47 所示。

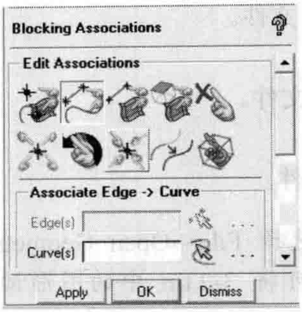


图3-46　选择面板

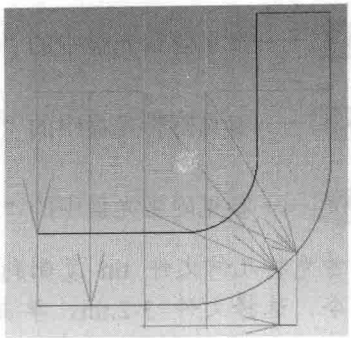


图3-47　完成关联后的块

5. 调整点的分布。单击 Blocking 工具栏中的按钮，打开 Move Vertices，单击按钮调整块上点的位置，以达到较高质量的网格。调整点后的模型如图 3-48 所示。

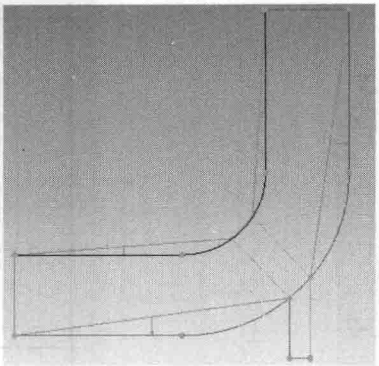


图3-48　分块后的模型

6. 生成网格。单击 Mesh 中的按钮，弹出网格参数设置面板，然后按照图 3-49 所示的参数设置，并单击按钮选择所有的线。然后，单击 Blocking 下的按钮，选择 Pre-Mesh Parameters 面板中的按钮，单击 Apply 按钮。再在模型树的 Blocking 中单击 Pre-Mesh，生成图 3-50 所示的网格。

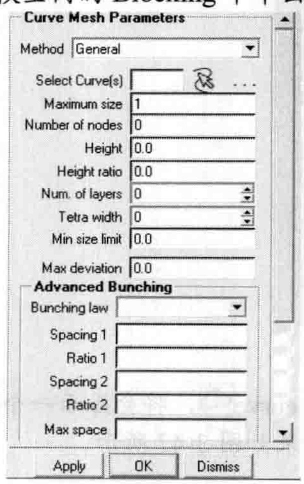


图3-49　参数设置

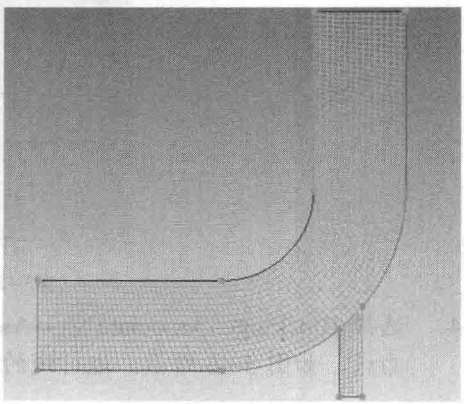


图3-50　生成的网格

7. 输出网格文件，选择 Output 下的 Select Solver，在弹出的图 3-51 所示的面板中选择求解器。然后选择 Output 下的 Write Input，在出现的 Save Current Project First 面板中选 No。在出现的选择文件对话框中选中相应的文件后，出现图 3-52 所示的输出 msh 文件的对话框，单击 Done 按钮即可输出 msh 文件到指定路径，这样 FLUENT 软件就可以将这个文件导入了。

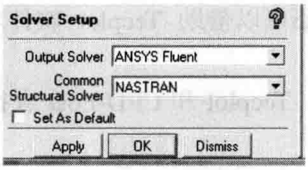


图3-51 选择求解器

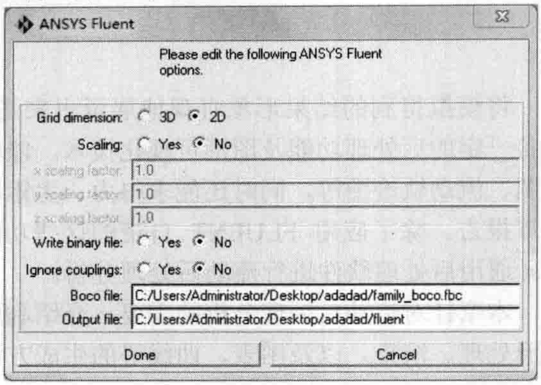


图3-52 输出 msh 文件的对话框

3.3 小结

本章主要讲述了前处理软件 Gambit 和 ICEM CFD 的使用方法和操作，包括几何建模、网格划分、边界定义等。通过两个例子的学习，读者可以了解 Gambit 与 ICEM CFD 的基本操作，为提高网格划分质量及工作效率打下基础。

第4章 模拟计算后处理

将模拟得到的结果形象直观地展示出来是流动分析后处理的主要工作。FLUENT 自身具备一定的后处理功能及图形可视化技术，能够显示各物理参数的云图、等值线图、速度矢量图、流动轨迹图等，同时还能求得力、力矩以及对应的力矩系数、流量等，并生成简要的计算报告。除了应用 FLUENT 自带的这些功能外，读者还可以借助 Tecplot 软件和 CFD-Post 通用后处理软件进行流动后处理分析。

本章针对流动后处理分析的需要，介绍利用 FLUENT、Tecplot 和 CFD-Post 进行可视化图形处理、渲染，以及图表、曲线等的生成方法。

本章内容

- FLUENT 图形的显示。
- FLUENT 曲线的绘制。
- FLUENT 的报告分析。
- FLUENT 的数据输出。
- Tecplot 的数据输入。
- Tecplot 的图形显示。
- CFD-Post 图形的绘制。
- CFD-Post 曲线的绘制。
- CFD-Post 报告制作。

4.1 FLUENT 内置后处理

FLUENT 自身具有强大的后处理能力，主要体现在图形可视化技术与文字报告上，下面对其相关后处理功能进行详细介绍。FLUENT 的图形及可视化技术主要是将流场分布以云图、等值线图、矢量图等形式呈现出来，通过这些图形的显示帮助用户分析流场的变化及相关物理参数的分布。

4.1.1 图形显示

一、云图与等值线显示

迭代计算结束后，选择 Display→Contours 命令，会弹出图 4-1 所示的 Contours 对话框。该对话框的 Contours of 为待选的物性参数，第一行下拉列表中主要包括速度

（Velocity）、压强（Pressure）、温度（Temperature）、密度（Density）等物性参数，如图 4-2 所示。用户可根据实际需要选择要显示的参数。第二行下拉列表为要显示物性参数的二级细化分类，如压强（Pressure）还分有静压（Static Pressure）、压力系数（Pressure Coefficient）、动压（Dynamic Pressure）、绝对压强（Absolute Pressure）、总压（Total Pressure）和相对总压（Relative Total Pressure）六个子类，如图 4-3 所示。对话框的 Phase 为相选择，若为单相流动，则不需要选择，若为多相流动，则可以在下拉列表中选择混合相或各单相，如图 4-4 所示。

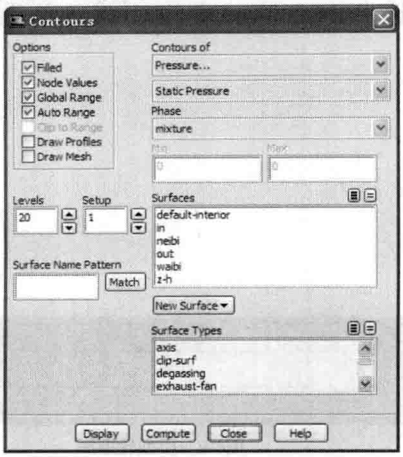


图4-1　Contours 对话框

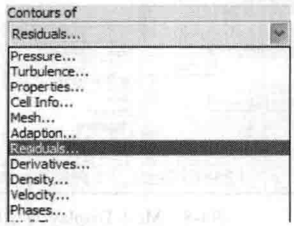


图4-2　Contours of 第一行下拉列表

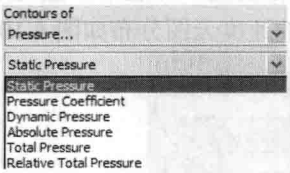


图4-3　Contours of Pressure 的第二行下拉列表

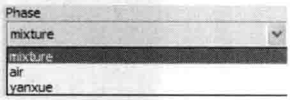


图4-4　Phase 下拉列表

对话框中的 Surfaces 为可以显示的面，通常包含边界定义时的进出口及壁面等，用户还可以自定义相关的切面或截面，通过选择 Surfaces 下的选项来显示对应面的物性参数分布。对于二维问题，通常不需要选择 Surfaces，因为二维问题本身就是一个面。Surface Types 为面的类型，当要显示的面唯一确定时，可以不用对其类型进一步定义。

Contours 对话框左侧的 Options 下方有几个重要的选项，若 Filled 被选中，则会显示云图，若不选中，则显示的为等值线图。例如，空气钻井环空纵剖面的速度云图与等值线图如图 4-5 与图 4-6 所示。

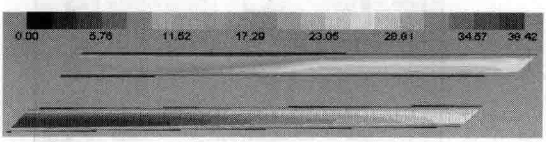


图4-5　速度云图

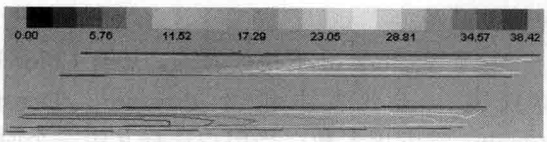


图4-6　速度等值线图

当 Auto Range 被选中时为全范围显示，当不选中 Auto Range 时，则系统自动选中 Clip to Range，用户此时可以在 Min 与 Max 中输入要显示的上下限。如设置空气钻井环空纵剖面的速度上限为 35m/s，下限为 15m/s，则显示的云图如图 4-7 所示。

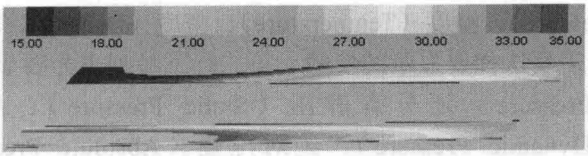


图4-7　改变上下限后的速度云图

Draw Mesh 可以帮助用户在云图和等值线图显示的同时显示网格及几何模型轮廓。当选中 Draw Mesh 时，自动弹出图 4-8 所示的 Mesh Display 对话框。若想显示几何模型的轮廓，可以选中 Options 下方的 Edges 复选框，并选中 Edge Type 中的 Outline 单选按钮，单击 Display 按钮，模型轮廓图如图 4-9 所示。

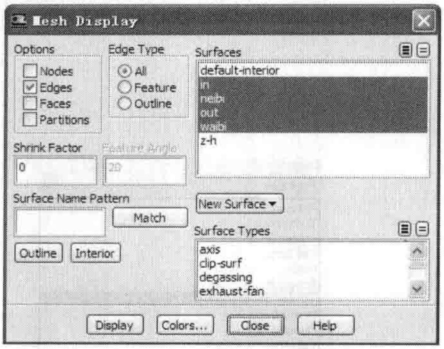


图4-8　Mesh Display 对话框

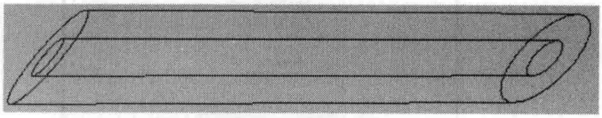


图4-9　模型轮廓图

轮廓显示可以在很大程度上帮助用户辨别切面或截面所在位置，并能形象直观地辅助呈现物性参数在纵向、横向上的分布变化，如有轮廓显示时切面的速度云图分布如图 4-10 所示。

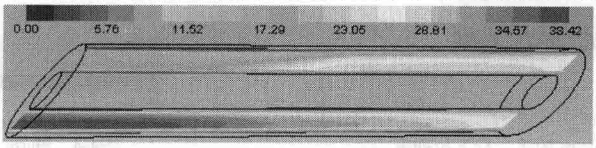


图4-10　有轮廓显示时切面的速度云图

二、速度矢量图显示

除了云图与等值线图外，用户还常用速度矢量图反映流体的运动情况。选择 Display→Vectors 命令，弹出图 4-11 所示的 Vectors 对话框，该对话框与 Contours 对话框相似，但 Vectors of 下拉列表中只有 Velocity 和 Relative Velocity，因为只能显示速度矢量图。

除了 Vectors of 下拉列表外，还有 Color by 下拉列表，该列表中包含 Pressure、Density、Velocity 等常用参数。当用户选择其中一个时，显示的矢量图的数值为该参数对应的数值，由于各参数的取值范围不一，所以颜色呈现不一。通常选择 Velocity，以显示速度矢量图。对话框的

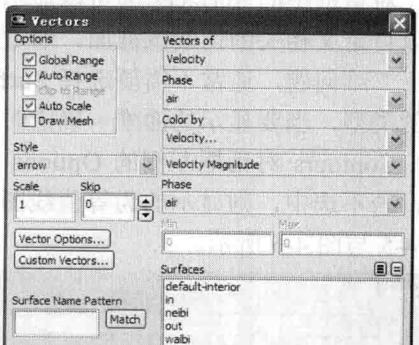


图4-11　Vectors 对话框

Surfaces、Surface Types 与 Contours 对话框一样，均为待显示的面及面的类型。同样，Options 下方的 Auto Range 及 Draw Mesh 用法也与云图显示时一致。当默认 Style 为 arrow、Scale 为 1、Skip 为 0 时，空气钻井环空纵剖面空气的速度矢量图如图 4-12 所示。Scale 用于改变箭头的大小，Skip 用于改变箭头的密度，用户可以调节 Scale 及 Skip，以使得矢量图清晰呈现。当设置 Scale 为 2、Skip 为 1 时，空气钻井环空纵剖面空气的速度矢量图如图 4-13 所示，较图 4-12 要清晰。Style 中除了 arrow 外，还有 cone（圆锥体）、filled-arrow（实心箭头）、harpoon（鱼叉）、headless（无头线）等种类，如图 4-14 所示。

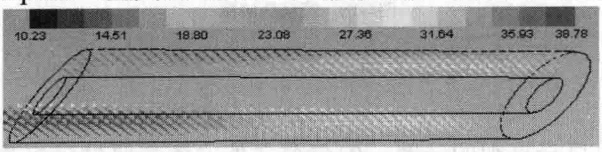


图4-12　速度矢量图

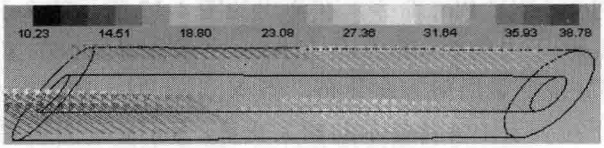


图4-13　改变 Scale 与 Skip 后的速度矢量图

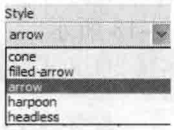


图4-14　Style 的种类

三、流动轨迹显示

FLUENT 还可以显示流体的流动轨迹，选择 Display→Pathlines 命令，弹出图 4-15 所示的 Pathlines 对话框。Release from Surfaces 为流动轨迹的初始源面；Step Size 为长度间隔，用于计算流体质点下一位置；Steps 为步数，通常应为一个流体质点能够前进的最大步数，Step Size 与 Steps 的乘积近似等于路径长度。如图 4-16 所示为井底射流的流动轨迹图。

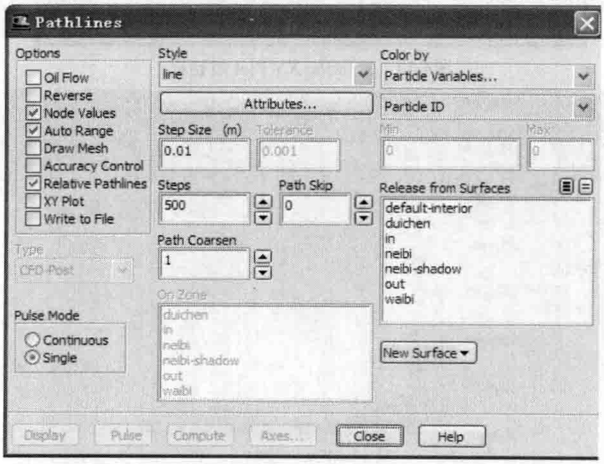


图4-15　Pathlines 对话框

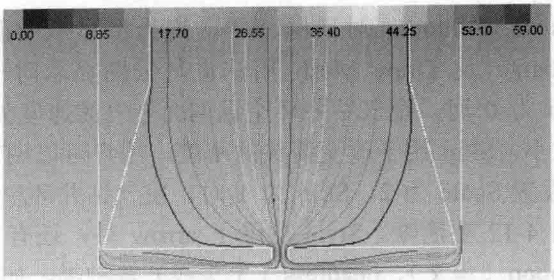


图4-16　流动轨迹图

4.1.2　曲线绘制

有时除了需要形象显示直观的云图、矢量图之外，还需要显示相关变量的坐标曲线图。这时，读者可以选择 Plots→XY Plot 命令，在弹出的图 4-17 所示的 Solution XY Plot 对话框中进行显示设置。Options 下方的 Position on X Axis 表示位置显示在 X 轴；Plot Direction 中的 X、Y、Z 表示需要呈现变量沿何方向分布，当 X 为 1 时，即显示沿 X 轴方向的变化情况；Y Axis Function 下拉列表中为待显示的相关变量，Surfaces 为需要显示的面。对于二维问题，Surfaces 可为线。我们显示井底射流速度沿 Y 轴方向的变化情况，设置参数如图 4-17 所示，单击 Plot 按钮后，其分布如图 4-18 所示。

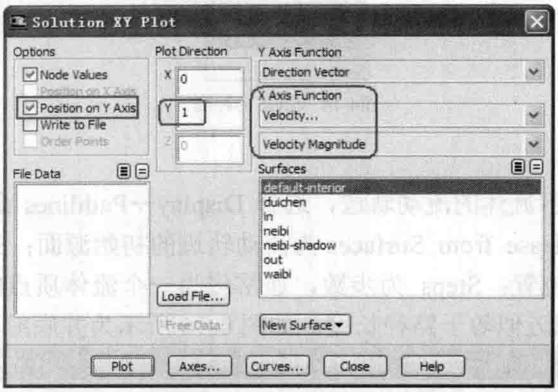


图4-17　Solution XY Plot 对话框

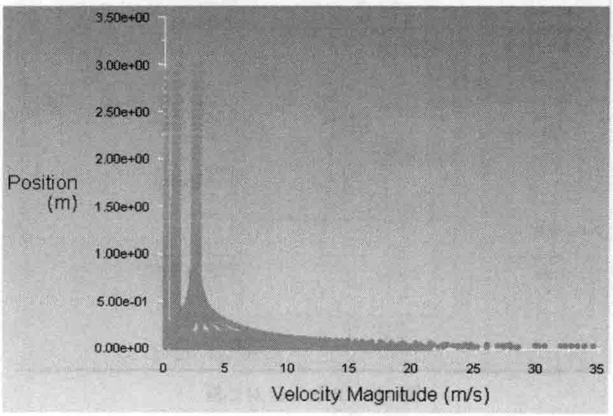


图4-18　曲线显示

单击 Solution XY Plot 对话框中的 Axes 按钮，会弹出图 4-19 所示的 Axes-Solution XY Plot 对话框，在该对话框中，用户可以设置 X、Y 轴的数值范围（Auto Range 为全范围显示）和坐标轴数值的显示格式（浮点数、整数等）。

单击 Solution XY Plot 对话框中的 Curves 按钮，弹出图 4-20 所示的 Curves-Solution XY Plot 对话框，该对话框可以帮助读者设置散点及曲线的颜色、显示方式和大小等。

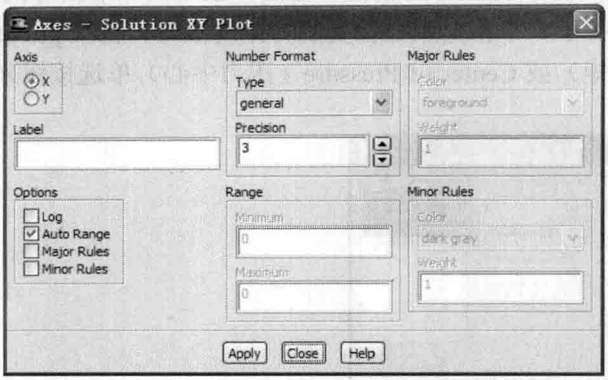


图4-19　坐标轴设置

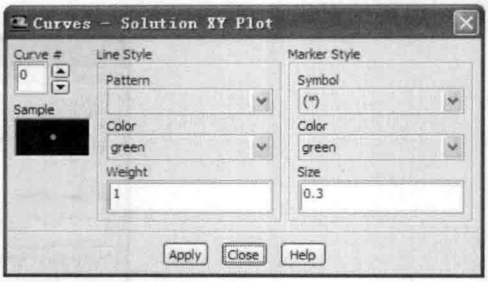


图4-20　散点、曲线形状与颜色设置

注意：当同时显示多条曲线时，通过改变不同曲线的颜色和形状可以有效帮助用户分辨曲线之间的区别。

4.1.3　报告分析

一、报告流量

在 Report 面板中双击 Fluxes 项，弹出图 4-21 所示的对话框，Result 列表框中显示了边界区域上的质量流率、热传输率和辐射热传输率等。

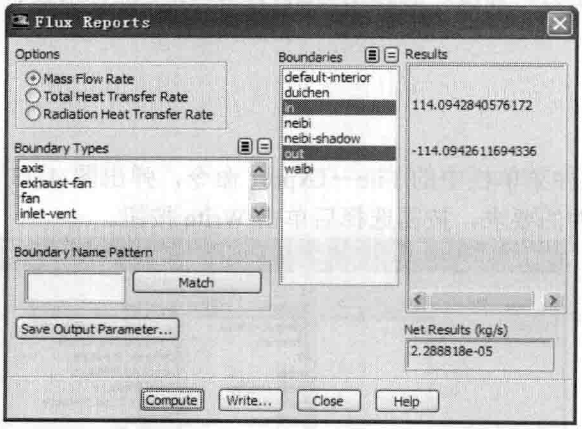


图4-21　Flux Reports 对话框

从 Options 中选中 Mass Flow Rate、Total Heat Transfer Rate 或者 Radiation Heat Transfer Rate 单选按钮。从 Boundaries 列表中选择想获得流量数据的边界区域（如 in 和 out），单击 Compute 按钮，即会在 Results 列表框中显示已选择的每个区域的选定流量计算结果，并在 Results 下的 Net Result 列表框中显示净流量。

二、报告作用力

FLUENT 可以计算和报告沿着一个指定矢量方向的作用力以及关于选择区域的一个指定中心位置的力矩。这个特性可以用于报告像升力、阻力及一个机翼需要计算的空气动力学系数。

在 Report 面板中双击 Force 项，打开 Force Reports 对话框，如图 4-22 所示。从中获取指定区域内沿着一个矢量方向的作用力或关于一个指定中心位置的力矩的报告。在 Options 列表框中选择 Forces（力）、Moments（力矩）或 Center of Pressure（压力中心）单选按钮来得到想要的报告。

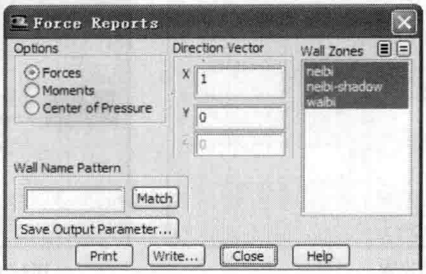


图4-22　Force Reports 对话框

如果用户选择的是一个作用力（Force）报告，则需要在 Direction Vector 中输入 X、Y 和 Z 的值来指定所需要计算力的方向；如果选择的是一个 Moments（力矩）报告，则需要在 Moment Center 中输入 X、Y 和 Z 坐标值来指定力矩中心。

在 Wall Zones 列表中选择想要的作用力和力矩信息报告区域。这里同样也可以用类似于显示流量的方法通过 Match 来快速选择所需要的区域。

单击 Print 按钮，在 FLUENT 控制窗口中将显示已选择的区域沿着指定的作用力矢量方向或指定力矩中心的压力、黏度、总作用力或力矩，以及压力系数、黏度系数、总作用力或力矩系数。

4.1.4　数据输出

选择 FLUENT 软件菜单栏中的 File→Export 命令，弹出图 4-23 所示的对话框。根据结果后处理所用外部软件的要求，按需选择后单击 Write 按钮。

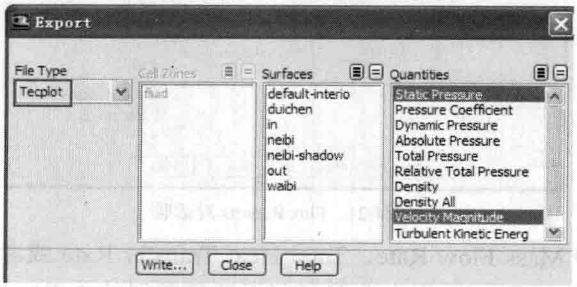


图4-23　Export 对话框

例如，输出 FLUENT 的计算结果到 Tecplot 软件进行后处理，则在 File Type 下拉列表中选择 Tecplot，在 Surfaces 列表中选择需要输出哪个面上的物理量（对于二维问题，可以

不做选择，即默认整个模型的几何面)，在 Quantities 列表中选择需要输出的物理量（输出静压强就选择 Static Pressure，输出速度就选择 Velocity Magnitude，也可以同时输出多个物理量)。单击 Write 按钮，即可将所选面上关注的物理量输出。

4.2 Tecplot 后处理

4.2.1 数据输入

在 Tecplot 中选择 File→Import 命令，弹出图 4-24 所示的数据加载对话框，列表中为可供选择的数据类型，共有 12 种。常用的有：CGNS 格式——计算流体力学通用注释系统格式；DEM 格式——数字评价图格式；DXF 格式，数字交换格式；Excel 表格式；Fluent 格式；General 格式；Gridgen 格式；HDF 格式——层级数据格式；HDF5 Image 文件格式——映像文件格式；PLOT3D 文件格式；Text spreadsheet 格式——文字表单格式。

这里我们只讲解读取 FLUENT 文件数据的过程，其余的可以查看专门的 Tecplot 书籍。选择 Select Import Format 中的 Fluent Data Loader，单击 OK 按钮，弹出图 4-25 所示的 FLUENT Data Loader 对话框。

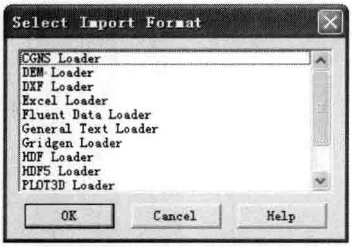


图4-24　Tecplot 数据加载对话框

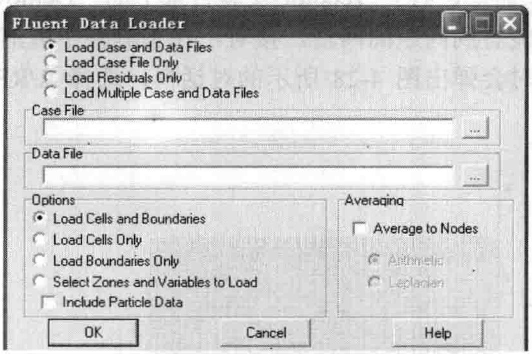


图4-25　Fluent Data Loader 对话框

该对话框的上侧选项为：Load Case and Data Files——加载工程和数据文件；Load Case File Only——只加载工程文件；Load Residuals Only——只加载残差数据；Load Multiple Case and Data Files——加载多个工程和数据文件。Options 下方为辅助选项，有加载单元和边界、只加载单元、只加载边界之分。在导入 FLUENT 数据时，通常用到的是 Load Case and Data Files，Options 下方选择 Load Cells and Boundaries，然后在 Case File 和 Data File 输入框中输入加载文件的详细路径，或者单击“…”按钮，从硬盘上选择要加载的文件。

对于某些需要特殊分析的数据，也可以从 FLUENT 中先导出为 Tecplot 数据，如 4.1.4 小节所述。在 FLUENT 中完成文件输出之后，可在 Tecplot 中通过 File→Load Data File(s)命令，读取刚输出的数据文件来进行处理，如图 4-26 所示，选择 v_tec 文件，单击“打开”按钮即可将 Tecplot 格式的数据导入 Tecplot 软件了。

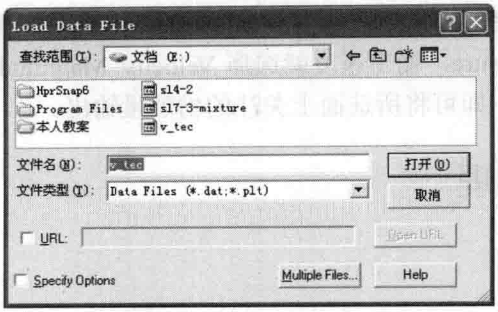


图4-26　Load Date File 对话框

4.2.2　图形显示

Tecplot 具有强大的图形及可视化技术，下面我们对其进行详细介绍。

一、云图显示

以 Tecplot 帮助文件自带的数据文件为源数据进行处理。

首先，选择 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。然后，选择 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 安装目录下的“Demo\2D\velocity.plt”，此时帧窗口如图 4-27 所示，只能看到问题的网格。接着，在工具栏中取消选中 Mesh 复选框，而选中 Contour 复选框，此时会弹出图 4-28 所示的对话框，选择 R/RFR，即可显示出该问题的云图，如图 4-29 所示。

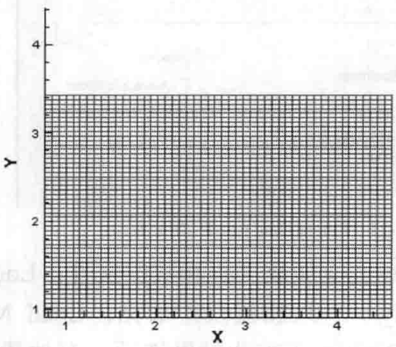


图4-27　网格显示

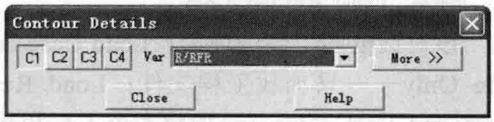


图4-28　Contour Details 对话框

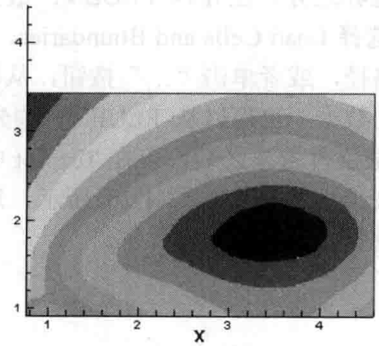


图4-29　云图显示

图 4-29 所示的云图没有标尺，若想添加标尺，需要单击 Contour Details 对话框中的 More 按钮，使对话框展开，如图 4-30 所示，选择 Legend 选项卡，并选中 Show Contour Legend 复选框，这时的帧窗口中即包含了云图的标尺，方便用户读数，如图 4-31 所示。

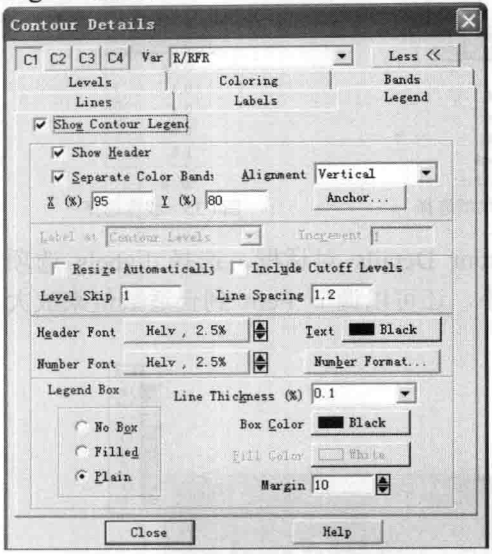


图4-30 展开的 Contour Details 对话框

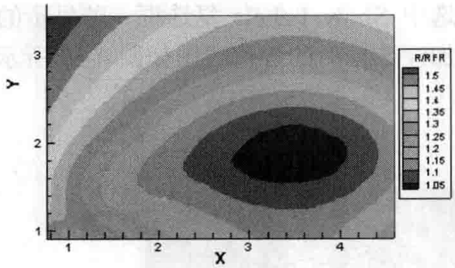


图4-31 带标尺的云图

二、等值线图显示及数据标注

等值线图是在云图之上建立的，在上述云图之上，单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出图 4-32 所示的 Zone Style 对话框。单击此对话框中的 Contour Type 按钮，会弹出有 Lines、Flood、Both Lines & Flood、Average Cell Flood 和 Primary Value Flood 选项的下拉列表，这里选择 Both Lines & Flood 选项，即同时显示等值线与云图。

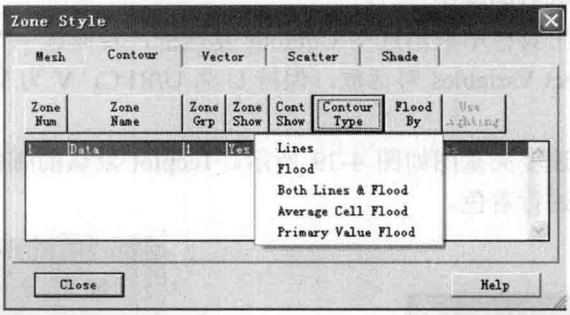


图4-32 Zone Style 对话框

在对话框中，还可以设置等值线的线型、颜色和宽度等参数，以达到最佳的显示效果。单击 Zone Style 对话框中的 Line Color 按钮，弹出图 4-33 所示的对话框，用户可以在其中选择想要显示的等值线颜色。单击 Zone Style 对话框中的 Line Pttrn 按钮，即出现图 4-34 所示的下拉列表，用户可以从其中选择 Solid（实线）、Dashed（虚线）、DashDot（点划线）、Dotted（点线）、LongDash（长虚线）和 DashDotDot（点划点线）等类型。单击 Zone Style 对话框中的 Line Thck 按钮，即出现图 4-35 所示的下拉列表，其中含有 0.02、0.1、0.4、0.8、1.5 等线宽。此时的等值线图如图 4-36 所示。

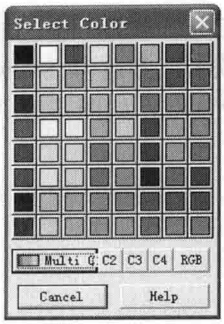


图4-33　色彩选择

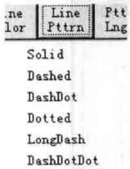


图4-34　线型选择

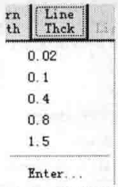


图4-35　线宽选择

若想在等值线上加注数据，用户需要打开 Contour Details 对话框，选择 Labels 选项卡，并选中 Show Labels 复选框。若显示的数字太小，还可以调节 Font 到合适数值来放大字体。加注数据后的等值线图如图 4-37 所示。

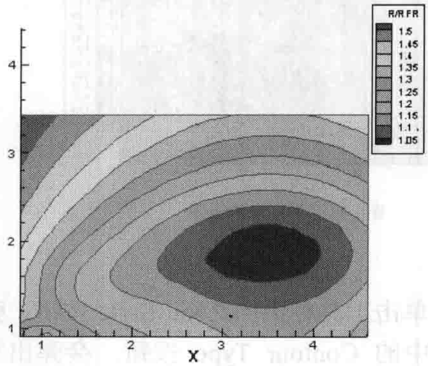


图4-36　等值线图

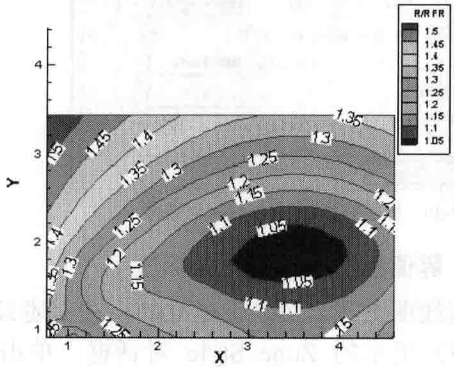


图4-37　加注数据的等值线图

三、速度矢量图及迹线图显示

延续上述问题，在工具栏中取消选中 Contour 复选框，转而选中 Vector 复选框，此时会弹出图 4-38 所示的 Select Variables 对话框，保持 U 为 U/RFC，V 为 V/RFC 的默认设置，单击 OK 按钮。

此时，帧窗口中的速度矢量图如图 4-39 所示。Tecplot 默认的颜色为红色，不能反映速度的大小，所以应对其进行着色。

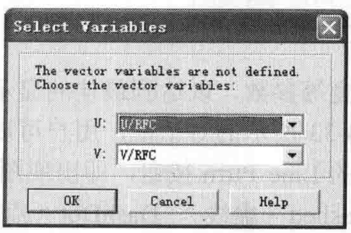


图4-38　Select Variables 对话框

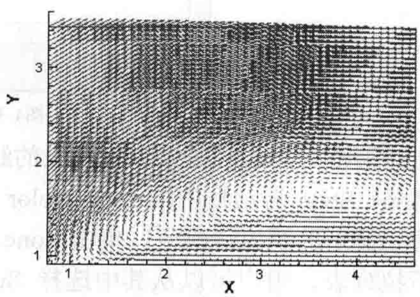


图4-39　默认颜色的速度矢量图

单击工具栏的 Zone Style 按钮，弹出图 4-40 所示的 Zone Style 对话框，单击对话框中的 Line Color 按钮，在弹出的颜色选择对话框中选择多色（Multi），然后单击 Close 按钮关

闭 Zone Style 对话框。这时的速度矢量图已经被着色，如图 4-41 所示，用户可以清晰地辨别各点的速度大小。

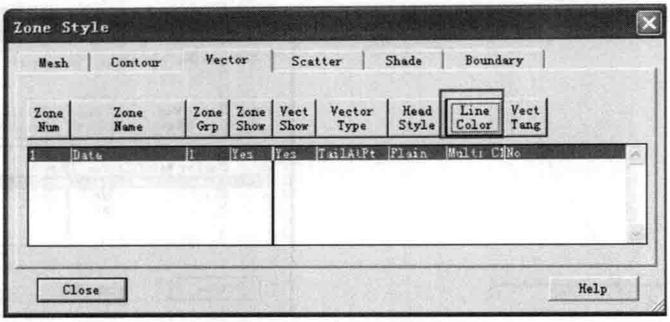


图4-40　Zone Style 对话框

流动迹线图是在速度矢量图的基础之上绘制的。单击工具栏中的按钮，然后在速度矢量图上上下拖动鼠标，便可以绘制出图 4-42 所示的迹线图。

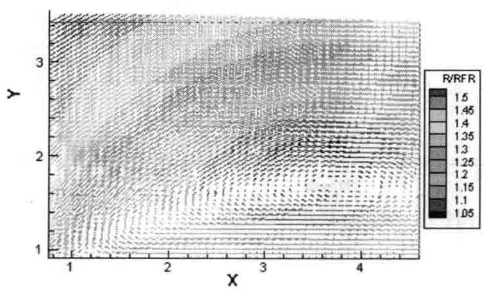


图4-41　选择线彩色显示

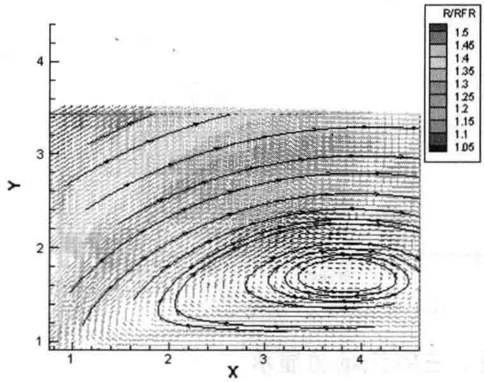


图4-42　迹线图

四、XY 曲线图显示

首先，选择 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。然后，选择 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 安装目录下的“Demo\XY\rainfall.plt”文件。在工具栏的帧模式中选择 XY Line，其图层格式有直线式、符号式、柱状式等，如图 4-43 所示。此时，帧窗口中的 XY 曲线只有一根曲线，如图 4-44 所示。



图4-43　XY Line 帧模式

单击工具栏中的 Mapping Style 按钮，弹出图 4-45 所示的对话框，单击 Map Show 按钮，选择下拉列表中的 Activate 选项，以激活 Dallas Rainfall 和 Miami Rainfall 曲线，如图 4-46 所示。

若选中图层的符号（Symbols）显示，可在 Mapping Style 对话框的 Symb Shape 中选择不同曲线点符号的样式，选择 Seattle Rainfall 曲线点样式为 Square，Dallas Rainfall 曲线点样式为 Delta，Miami Rainfall 曲线点样式为 Circle，曲线图即可变成图 4-47 所示的形式，以

方便用户进行分析。

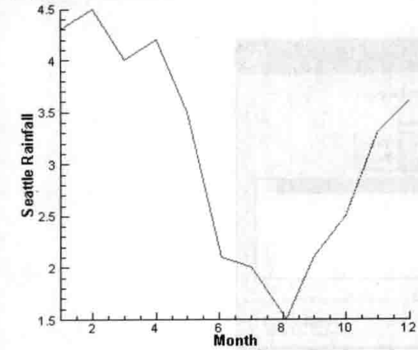


图4-44　XY 曲线

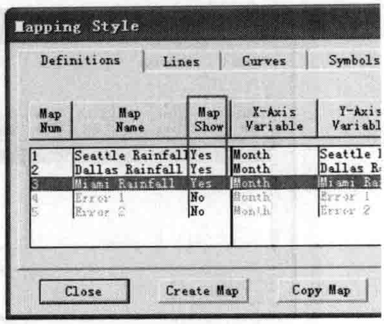


图4-45　Mapping Style 对话框

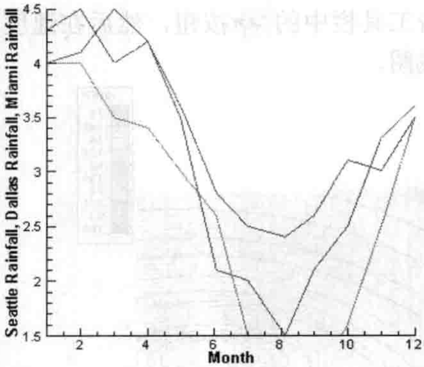


图4-46　三根 XY 曲线

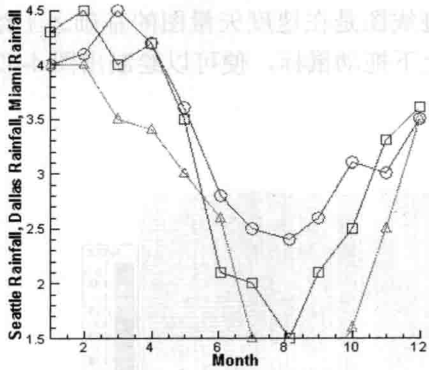


图4-47　带有点样式的曲线图

五、三维流场图显示

三维问题的云图、等值线图、矢量图的处理方法与二维一样。针对三维数据，Tecplot 还有特殊的绘图格式——围墙图，其形状类似于用围墙将平面分割成许多小格子。

围墙面的数据可以是 IJ 有序数据，也可以是 I、J、K 平面和 IJK 数据。围墙面的特别之处在于要绘制出底面数据，然后绘制出垂直于底面的数据作为围墙，并把面分割成小格子。下面我们介绍围墙图的绘制。

首先，选择 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。然后，选择 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 安装目录下的“Demo\3D_Volume\fluid.plt”文件。取消选中工具栏中的 Mesh 复选框，而选中 Contour 复选框，在弹出的图 4-48 所示的 Contour Details 对话框中选择 Var 为 E。单击 Close 按钮，关闭 Contour Details 对话框，此时的云图如图 4-49 所示。

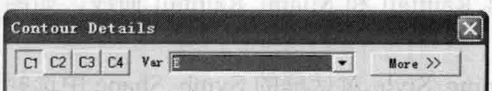


图4-48　Contour Details 面板

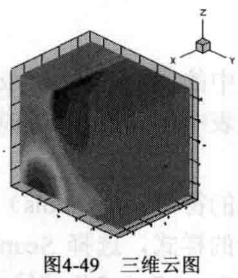


图4-49　三维云图

下面进行围墙图的具体绘制。单击 Zone Style 按钮，在弹出的图 4-50 所示的 Zone Style

对话框中选择 Surfaces 选项卡，然后单击 Surfaces to Plot 按钮，在下拉列表中选中 I-J-K-Planes，此时可以看到只有 X 方向有了围墙面，如图 4-51 所示。

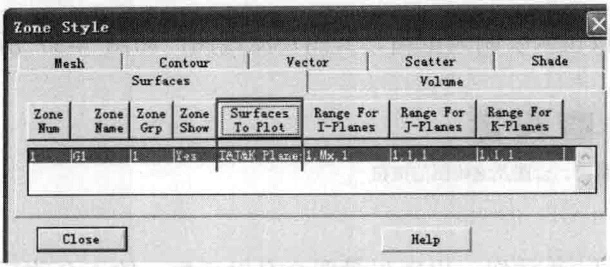


图4-50　Zone Style 对话框

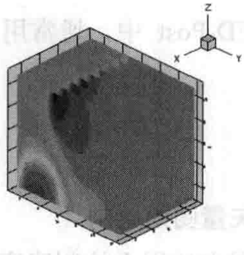


图4-51　只有 X 方向的围墙面

接着，我们需要调节围墙图的范围。在 Zone Style 对话框的 Surfaces 选项卡中，单击 Rang for I-Planes 按钮，弹出图 4-52 所示的 Enter Range 对话框，改变 Skip 为 5，单击 OK 按钮。同理，单击 Rang for J-Planes 按钮，也将其 Skip 改为 5；单击 Rang for K-Planes 按钮，将其 Skip 改为 Mx。

最后，单击工具栏中的按钮，将图形调至合适视图，如图 4-53 所示。

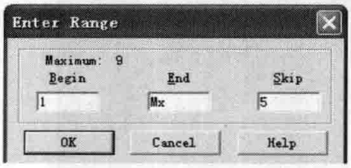


图4-52　范围设定对话框

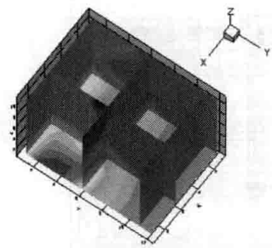


图4-53　围墙图效果

4.3　CFD-Post 通用后处理

ANSYS CFD-Post 是 ANSYS CFD 产品的新一代后处理工具，可以单独运行或者在 Workbench 下运行。本节简要介绍 CFD-Post 的用法。启动 CFD-Post 后，主界面显示如图 4-54 所示。

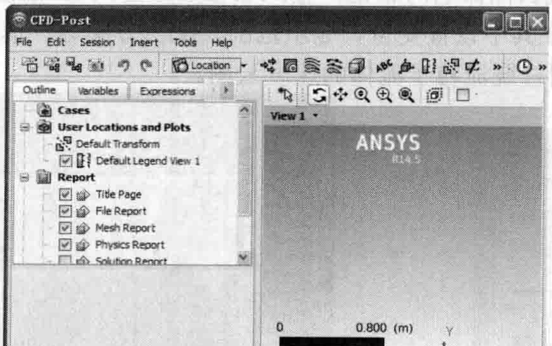


图4-54　CFD-Post 主界面

4.3.1 图形绘制

在 CFD-Post 中，通常用工具栏中的按钮来绘制矢量图、云图及流线图，如图 4-57 所示。

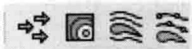


图4-55　绘制矢量图、云图及流线图的按钮

一、矢量图的绘制

矢量图主要用于绘制速度矢量图。单击按钮，出现矢量图命名对话框，输入名称后单击 OK 按钮，出现矢量图细节设置面板，如图 4-56 所示。该面板有 Geometry、Color 和 Symbol 选项卡。在 Geometry 选项卡中，可以设置绘图区域、绘图位置、样式、缩放因子等参数；在 Color 选项卡中，可以设置染色模式、范围和配色方案等；在 Symbol 选项卡中，可以设置箭头形式和大小。

图 4-57 所示为圆柱绕流粒子流体的速度矢量图。

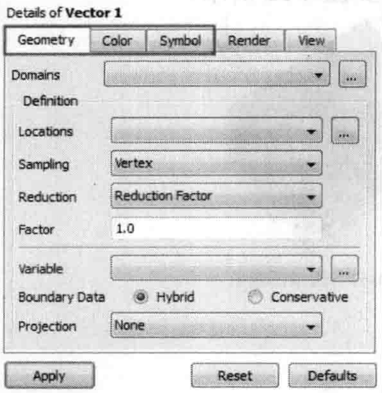


图4-56　矢量图细节设置面板

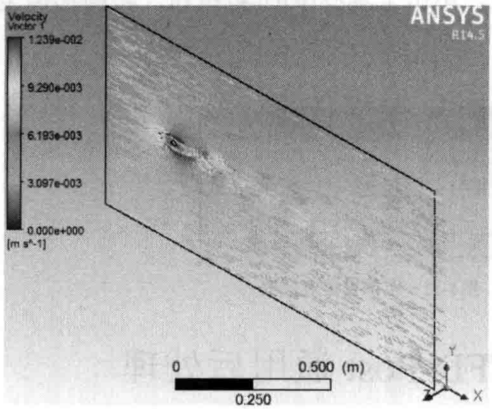


图4-57　矢量图显示

二、云图的绘制

单击按钮，出现云图命名对话框，输入名称后单击 OK 按钮，出现云图细节设置面板，如图 4-58 所示。在其中设置变量、显示范围、配色方案等，单击 Apply 按钮即可生成云图。图 4-59 所示为圆柱绕流粒子流体的速度云图。

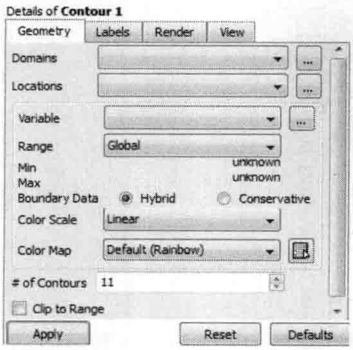


图4-58　云图细节设置面板

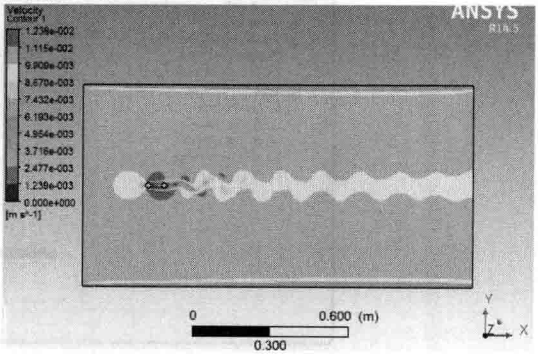


图4-59　云图显示

三、流线图的绘制

单击 按钮，出现流线图命名对话框，输入名称后单击 OK 按钮，出现流线图设置面板，如图 4-60 所示。

在 Geometry 选项卡中设置流线类型、绘图区域、流线起始位置、流线数量、变量、流线相对于起始面的方向等；在 Color 选项卡中设置着色模式、着色变量、范围和配色方案等；在 Symbol 选项卡中设置流线形式、流线粗细等。

图 4-61 为圆柱绕流粒子流体的流线图。

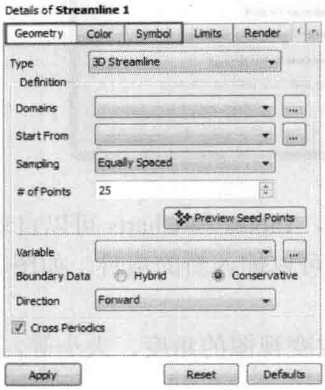


图4-60　流线图设置面板

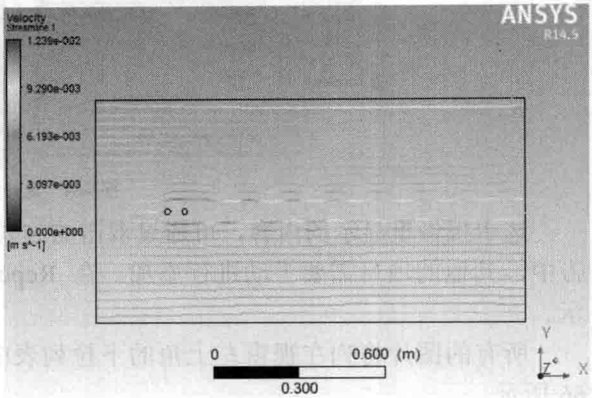


图4-61　流线图显示

4.3.2　曲线绘制

CFD-Post 中的曲线主要显示两个变量之间的关系，先创建线、曲线、多段线、边界交线、等值线等；然后选择要创建的类型为 XY、XY-Transient or Sequence 或者 Histogram，创建数据系列；最后指定 X 轴和 Y 轴变量。

在图 4-62 所示的 3 种类型中，XY 基于线；XY-Transient or Sequence 基于点，典型的应用是表现变量在某点的瞬态变化的计算结果，数据必须是瞬态结果文件；Histogram 能建立各种数据类型的柱状图，X 轴变量为离散量，Y 轴为频率。

图 4-63 所示为圆柱绕流粒子流体的压力曲线图。

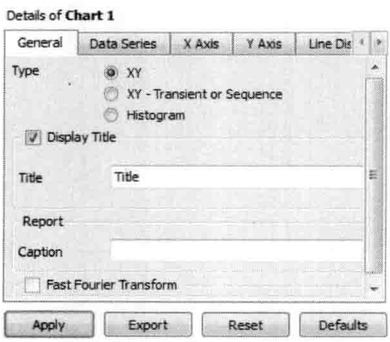


图4-62　曲线设置

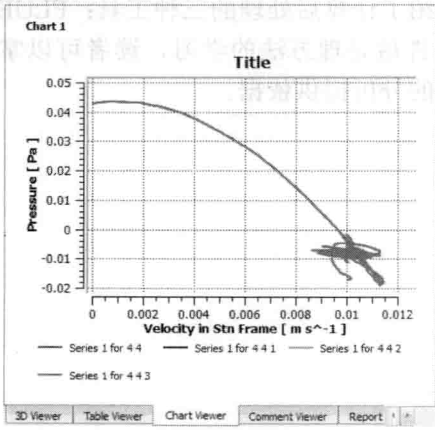


图4-63　曲线图显示

4.3.3 报告制作

使用 CFD-Post 的报告生成工具可以通过定制报告的方式快速生成报告。

基于结果文件的类型，可以自动选择报告模板，右击 Report 可以进行模板的选择，也可以对已有的模板进行修改，例如添加 Logo、Charts、Tables、Plots 等，如图 4-64 所示。



图4-64　选择报告模板

选中报告里显示的内容，可通过双击的方式进行编辑，Tables 和 Charts 可以自动加入报告中，其他的项目需要手动进行添加。在 Report 上右击可以插入新的项目，如图 4-65 所示。

所有的图片将列在视窗左上角的下拉列表中，可以改变视图的角度、大小等，如图 4-66 所示。

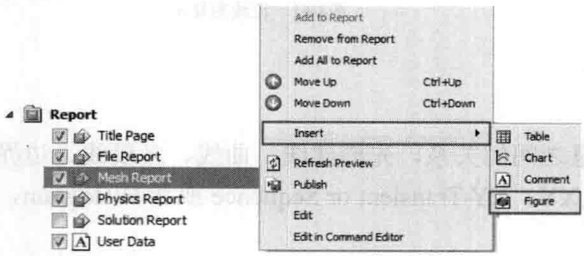


图4-65　添加报告内容

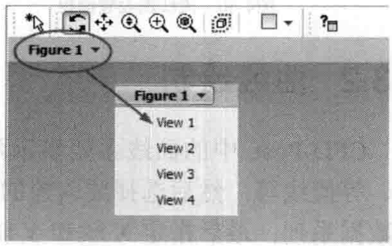


图4-66　往报告中添加图片

4.4　小结

本章介绍了计算后处理的三种工具：FLUENT 内置后处理、Tecplot 和 CFD-Post。通过对这三种软件后处理方法的学习，读者可以掌握图形、曲线、报告等计算结果的绘制与生成，为结果的分析提供依据。

第5章 钻井工程中的应用

钻井液是钻井工程的“血液”，它承载着水力破碎岩石、有效传递水力功率、平衡井壁岩石侧压力、平衡地层压力、清洁井底、携带岩屑、冷却和润滑钻头及钻柱的重要作用。钻井液可能是液体或气体，分为清水、泥浆、无黏土相冲洗液、乳状液、泡沫和压缩空气等。认清钻井液在钻杆与环空中的运动规律，有助于设计钻井排量、控制钻进速度、评价井眼净化效果和预测钻柱寿命等。本章将对 FLUENT 在钻井工程中的应用进行介绍，通过四个典型实例详细介绍钻井工程中所涉及的流体问题的数值处理方法及过程。

本章内容

- 钻井工程中涉及的 CFD 问题。
- 环空中的气固两相流动模拟。
- 环空中的气液两相流动模拟。
- 井底射流模拟。
- 井内气液固三相流动模拟。

本章案例

- 实例 1：空气钻井环空气固两相流动模拟。
- 实例 2：气侵过程环空气液两相流动模拟。
- 实例 3：井底喷嘴射流分析。
- 实例 4：泡沫冲砂洗井模拟。

5.1 概述

钻井是石油勘探、石油开发一个非常重要的环节与手段。在地质普查阶段，为了研究地层剖面、寻找储油构造，要钻地质井、基准井、制图井、构造井等；在区域详探阶段，为了寻找油气藏，并详细研究其储量、性质，要钻预探井、详探井、边探井等；在油田开发阶段，为了开采油气，需要钻生产井、注水井、观察井等。不管钻什么类型的井，都需要注入钻井液，以便及时把岩屑从井底清洗出来。钻井液除了及时携带岩屑到地面外，还具有保护井壁、控制井内压力、冷却和润滑钻头及钻柱等功能，因此被誉为钻井工程的“血液”。

常规的钻井液为泥浆，图 5-1 为泥浆钻井的工艺流程示意图。泥浆经过泥浆泵注入钻杆，然后通过钻杆流至井底，从钻头喷出后，携带井底岩屑从钻杆与井眼构成的环形空间中

上返至地面，再由振动筛进行岩屑分离，回收泥浆至泥浆池，从而实现循环利用。泥浆本身以液体为主，但为了满足实际需求而添加有不同组分，如一些固相加重材料。于是，泥浆可能是非牛顿流体，比如幂律流体、塑性流体等。那么，泥浆泵的注入压力、排量如何设置？钻进速度是多少？井口返出固相含量是多少？诸如此类问题都与泥浆在井筒中的流动规律密切相关。然而，开展泥浆流动规律研究的实验成本高、代价大，且具有高风险，于是 CFD 仿真技术便成了很好的选择。尤其在发生气侵、地层出水等复杂钻井事故时，井筒中的流体相态、流型等都发生了剧烈变化，这时的流场分布情况对井控措施的选择十分重要。利用 FLUENT 开展相关问题的预测，建立预测数值数据库，为此类问题的解决提供了较佳方案。

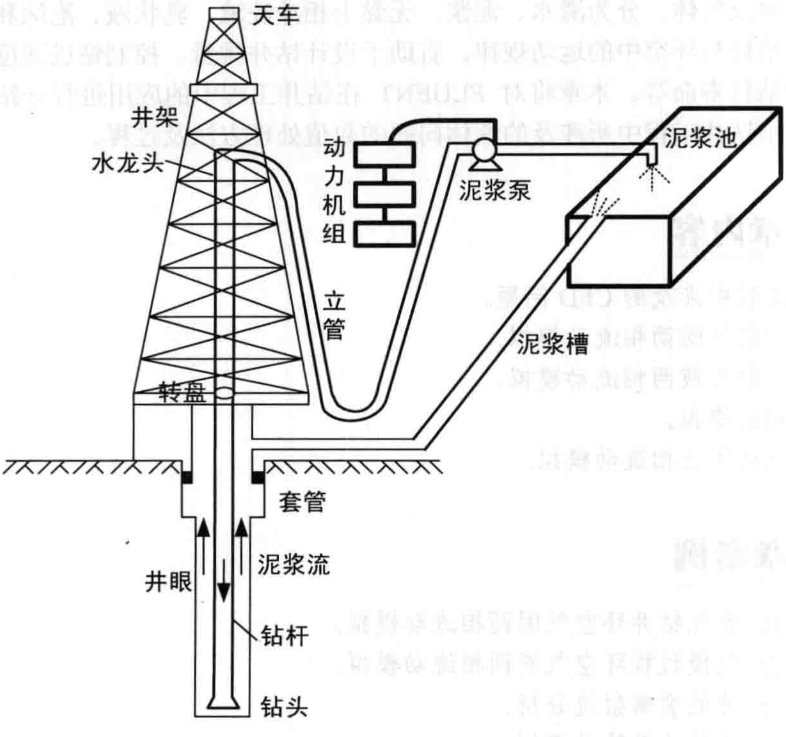


图5-1　常规泥浆钻井的工艺流程示意图

随着钻井技术的发展，除了泥浆可以作为钻井液外，气体成为一种新型钻井液。按所采用循环介质的不同，气体钻井又可分为空气钻井、氮气钻井、泡沫钻井、雾化钻井、天然气钻井和尾气钻井等。气体钻井典型的工艺流程如图 5-2 所示，压缩气体先后经空压机→增压机→注气管线→立管注入井下，经钻头水眼喷出后，进入井筒环空携岩上返至地面，再经由排砂管线排入地面回收池。气体钻井因井底岩屑承压较常规泥浆钻井大幅降低，钻进速度有显著提高，且压缩气体在环空中迅速膨胀，提高了气流速度和携岩动能，能安全地携带岩屑上返至地面，满足井眼净化要求。然而，环空中高速携岩的气流对钻柱造成了严重的冲刷，尤其是钻柱接头部位，降低了钻柱的使用寿命。因此，采用 FLUENT 软件研究气体钻井时的环空气固两相流动规律及冲蚀效应十分必要。

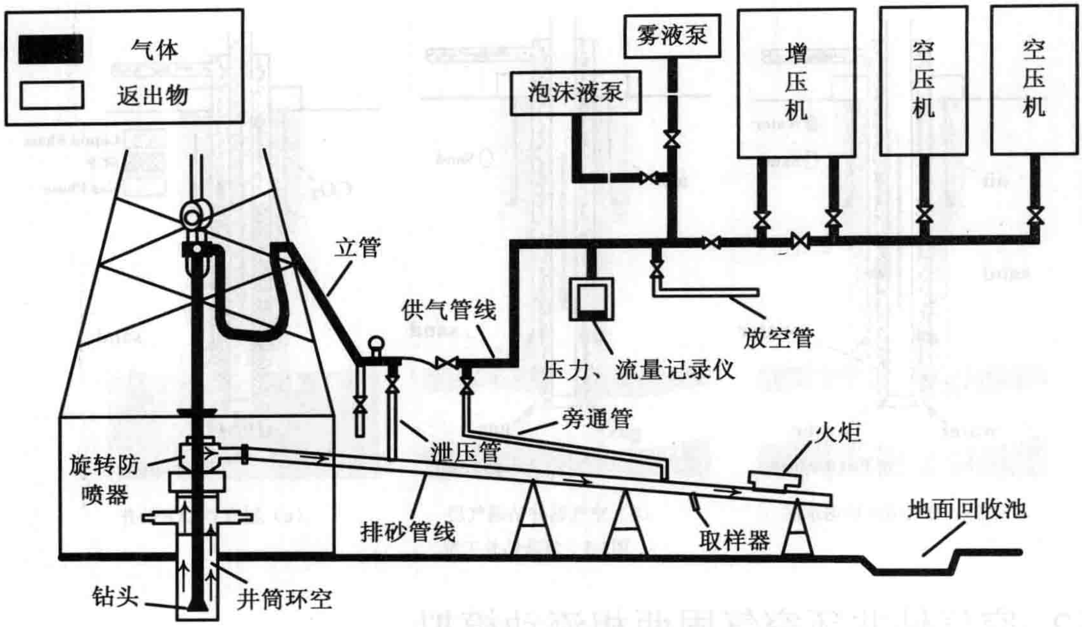
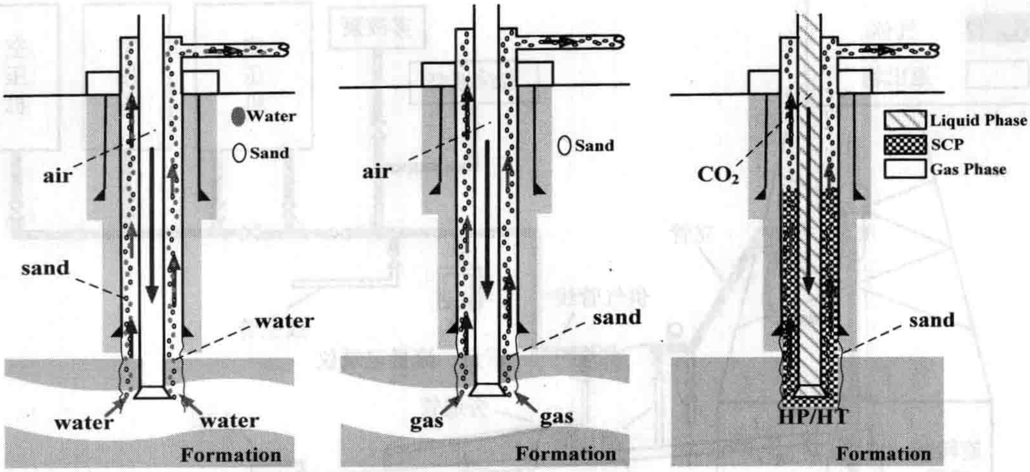


图5-2 气体钻井工艺流程示意图

另外，气体钻井也会遇到一些复杂工况，比如钻遇水层、气层等，如图 5-3 所示，此时环空中的流动规律将出现明显的变化。如果钻进过程中钻遇水层，地层水侵入井筒，随着高速携岩气流上返，不仅会使气固两相流转变为气液固三相流，还会导致地面排砂管线入口流量增加，管内流场出现脉动，从而加剧管线振动。如果钻进过程中钻遇气层，地层气流也会侵入井筒，并不断膨胀，使得排砂管线入口流量剧增和管内流场突变，更加剧了管线的振动。倘若钻遇的气层是酸性气层（含 H_2S），排砂管线将承受酸性介质腐蚀和多相流体冲蚀双重压力，且腐蚀、冲蚀和振动存在交互影响，作用机理更为复杂，由其引起的排砂管线失效后果更不堪设想，含硫气体将会从失效点高速喷出并泄放扩散开来，势必造成极其严重的安全事故，甚至付出血的代价。近年来，随着温室效应的加剧、CO_2 排放量的不断攀升和人们对超临界流体的重新认识，超临界 CO_2 作为一种新的气体钻井介质开始用于低渗油气藏钻井。由于超临界 CO_2 流体密度相对较高，井底压力容易控制，且它不仅不会污染储集层，进入储集层后反而能够增大储集层渗透率，提高原油采收率，因此该技术得到了油田企业的关注。然而，不可忽视的是，CO_2 属于酸性气体，进入地面排砂管线后同样可能引起管线腐蚀，且 CO_2 在井筒内将发生剧烈相变，到达地面时形成膨胀气流，对排砂管线的冲击作用不可小视。对于诸如此类的复杂工况，进行数值仿真研究省时省力，计算结果可以为复杂事故的处理提供较好的参考依据。

可见，钻井工程中涉及的流体流动问题复杂多样，既有井筒中的多相流动问题，又涉及流固耦合振动、冲蚀等问题，利用 FLUENT 软件开展相关的数值模拟，可以为工程实践提供有价值的参考。下面就钻井工程中出现的几个典型问题进行分析，帮助读者掌握利用 FLUENT 解决钻井问题的方法及过程。



（a）空气钻井钻遇水层　（b）空气钻井钻遇气层　（c）超临界 CO_2 钻井

图5-3　复杂钻井工况

5.2 空气钻井环空气固两相流动模拟

5.2.1 案例简介与思路分析

空气钻井是以空气做循环介质携带岩屑的钻井技术，作为欠平衡钻井技术的一个分支，它因钻速快、成本低和对储层伤害小的显著特点倍受人们关注。20 世纪 90 年代，美国、加拿大、欧洲一些国家开始了气体钻井技术的应用，并不断发展完善。我国在 20 世纪 60 年代对四川盆地进行了气体钻井的早期探索。近年来，新疆、长庆、四川、玉门等油田的部分油气井已推广气体钻井技术，并取得了良好的效果。但空气钻井的整体技术还有待进一步完善，尤其是环空气固两相流场分布的控制还需进一步研究，以求有效衡量空气的携岩能力和冲蚀效应，为工艺参数的设计提供依据。

【案例简介】

如图 5-4 所示，取井斜 5°的 10m 环空井段进行模拟分析，井眼为 ϕ316.5mm（环空外径），钻杆为 ϕ127mm（环空内径），套管与钻杆的绝对粗糙度为 0.04678mm（环空内外壁的粗糙程度），岩屑的密度为 2600kg/m^3，比热为 1100J/(kg·K)，导热系数为 0.3W/(m·K)。气固两相混合物从下部入口进入，空气流速为 25m/s，岩屑流速为 15m/s，岩屑的体积分数为 0.02，颗粒直径为 0.001m。

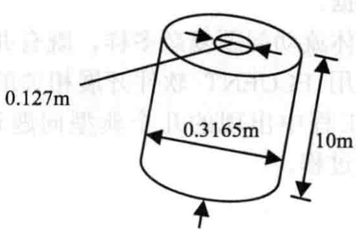


图5-4　环空模型示意图

【思路分析】

本例为三维的气固两相流动模拟，首先要建立三维模型。由于是简单的三维环空柱体模型，这里选择用 Gambit 软件进行建模与网格划分。然后在 FLUENT 中调用多相流模型，可以是欧拉模型，也可以是混合模型。这里我们选择欧拉模型，读者有兴趣可以尝试用混合模型进行模拟，其具体操作相同，这里不再详述。具体操作流程如图 5-5 所示。

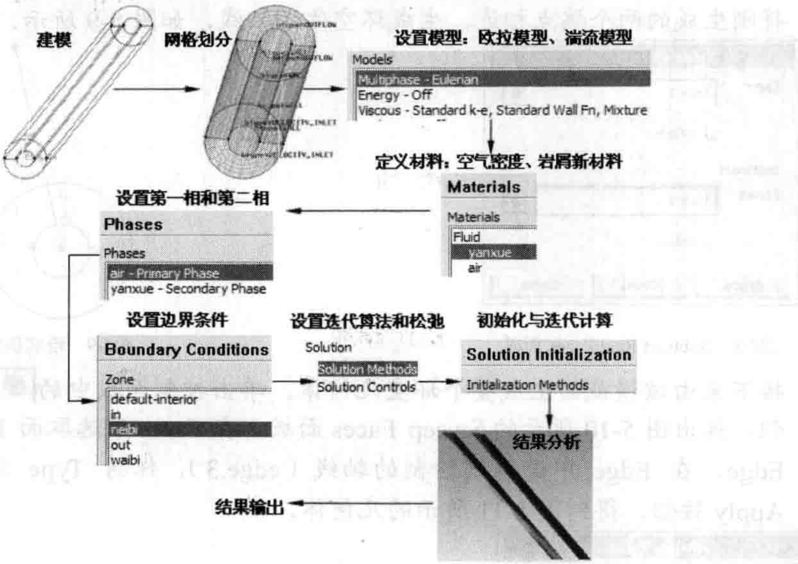


图5-5　空气钻井环空气固两相流模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch5\5-2.msh、5-2.cas、5-2.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch5\5-2.avi”文件。

5.2.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，在图 5-6 所示的 Create Real Circular Face 面板的 Radius 中输入 0.15825，保持 Plane 为 XY（即建立在 XOY 面上），单击 Apply 按钮。然后，再次在 Radius 中输入 0.0635，单击 Apply 按钮，得到图 5-7 所示的几何面域。

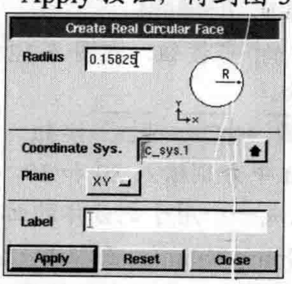


图5-6　Create Real Circular Face 面板

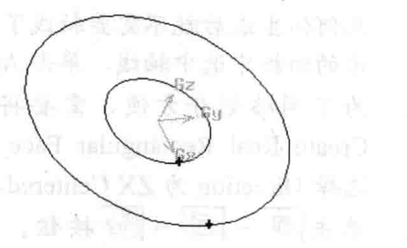


图5-7　几何面域

2. 单击 Face 面板中的 按钮，在图 5-8 所示的 Subtract Real Faces 面板的第一

行 Face 中选取面 1（face.1），在第二行的 Faces 中选取面 2（face.2），单击 Apply 按钮，即用面 2 去减面 1，得到环空的横截面。

3. 单击 → → 按钮，默认 x、y、z 都为 0，单击 Apply 按钮，绘制出原点，然后在 x 中输入 0.87，z 中输入 9.96，默认 y 为 0，单击 Apply 按钮，生成管轴上的另一点。单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中将刚生成的两个端点相连，生成环空体的轴线，如图 5-9 所示。

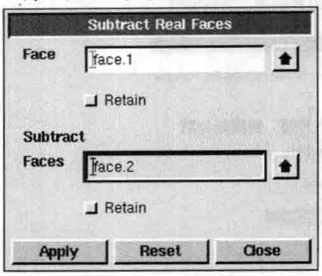


图5-8　Subtract Real Faces 面板

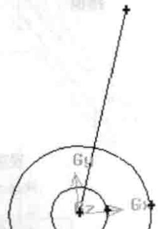


图5-9　绘制轴线

4. 接下来由该横截面生成整个环空几何体。单击控制面板中的 → → 按钮，弹出图 5-10 所示的 Sweep Faces 面板，在 Faces 中选取面 1，选择 Path 为 Edge，在 Edge 中选取刚绘制的轴线（edge.3），保持 Type 为 Rigid，单击 Apply 按钮，得到图 5-11 所示的几何体。

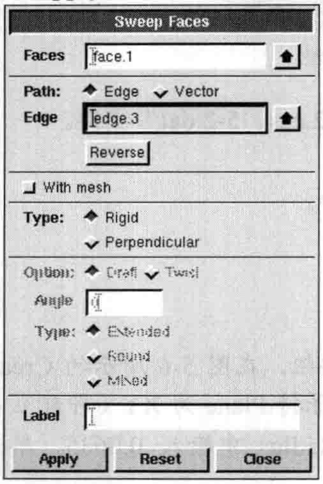


图5-10　Sweep Faces 面板

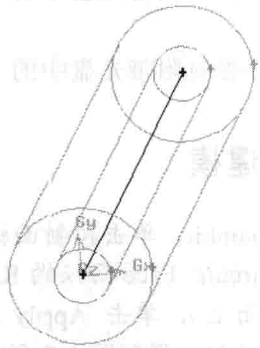


图5-11　几何模型体

5. 几何体生成后就不需要轴线了，故单击 Edge 面板中的 按钮，在图 5-12 所示的面板中选中轴线，单击 Apply 按钮，将轴线删除。

6. 为了网格划分方便，需要将体进行划分。单击 → → 按钮，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 20 和 10，并选择 Direction 为 ZX Centered，单击 Apply 按钮，生成一个用于剖分体的面。

7. 单击 → → 按钮，在图 5-13 所示的 Split Volume 面板中选择 volume.1，选取 Split With 为 Faces（Real），然后选择 Faces 为刚生成的面 5，单击 Apply 按钮，得到图 5-14 所示的几何体。

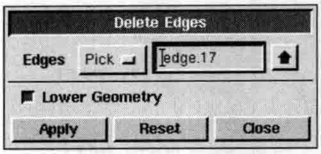


图5-12　Delete Edges 面板

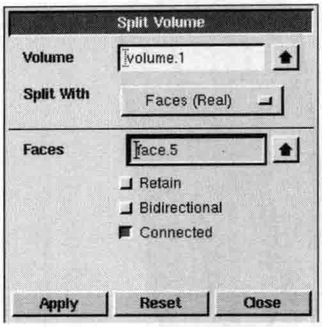


图5-13　Split Volume 面板

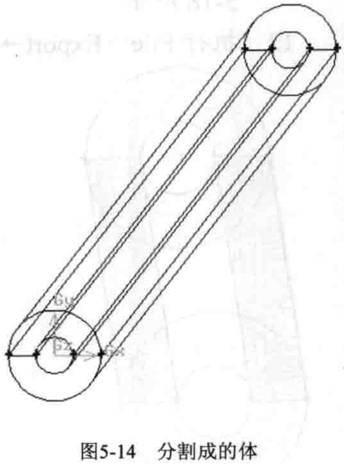


图5-14　分割成的体

5.2.3 网格划分

8. 单击 → → 按钮，在 Edges 输入框中选择径向的四根线段，采用 Interval Count 的划分方法将其划分为 5 段。利用同样的分段划分方式将内外圆弧都分为 20 段，将轴向线段分为 50 段，得到图 5-15 所示的线网格。

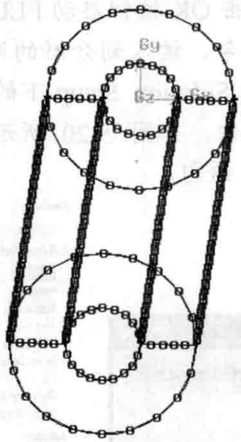


图5-15　线网格

9. 单击 → → 按钮，选择划分有线网格的横截面及轴向剖面，采用 Quad 和 Map 的划分方式，得到图 5-16 所示的面网格。
10. 单击 → → 按钮，选中分割的两个体（volume.1 和 volume.2），采用 Hex 和 Map 的划分方式进行体网格划分，得到图 5-17 所示的体网格。
11. 网格划分好后，定义边界类型。单击 → 按钮，选中下部进口面（face.1 和 face.6），定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 in；选中上部出口面（face.4 和 face.10），定义为自由出流边界（OUTFLOW），名称为 out；选择内壁面（face.3 和 face.7），定义为 WALL 边界，名称为 neibi；同样，将外壁面（face.2 和 face.9）也定义为 WALL 边界，名称为 waibi，如图

5-18 所示。

12. 执行 File→Export→Mesh 菜单命令，将网格输出为 5-2.msh。

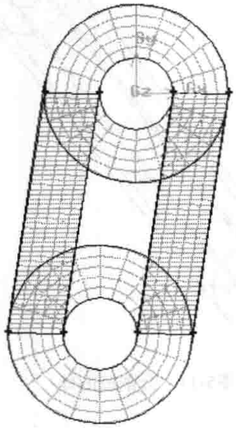


图5-16　面网格

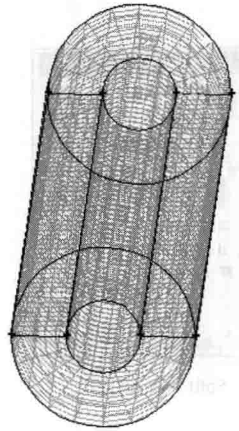


图5-17　体网格

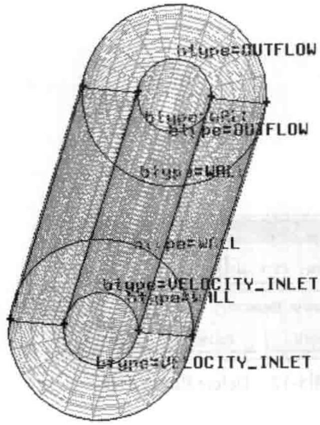


图5-18　边界类型定义

5.2.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的图 5-19 所示的 FLUENT Launcher 窗口中选择 3D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 执行 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件“5-2.msh”。网格读入之后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，于中间 General 控制面板中单击 Check 按钮，如图 5-20 所示，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。

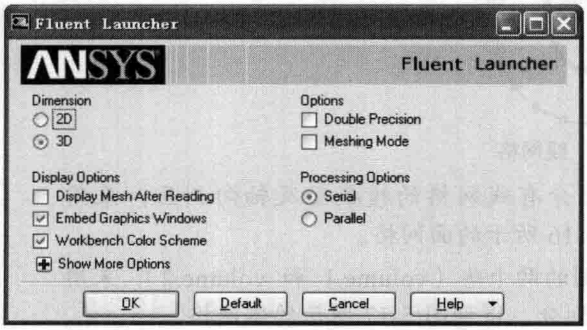


图5-19　FLUENT Launcher 窗口

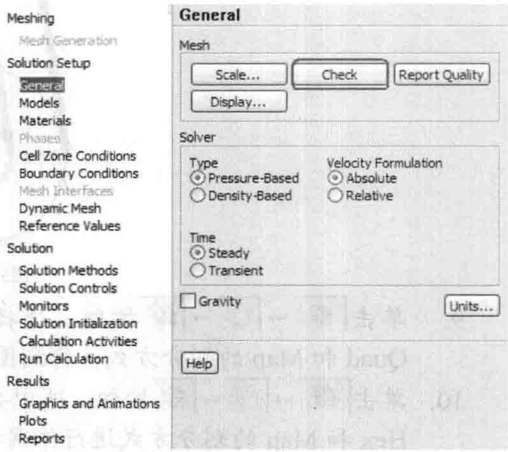


图5-20　检查网格

3. 此时视图窗口中并没有网格的显示，为了显示网格，单击 General 控制面板中的 Display... 按钮，弹出图 5-21 所示的 Mesh Display 对话框。在 Mesh Display 对话框的 Surfaces 列表中选择 in、neibi、out、waibi，在 Options 栏中选中 Edges 复选框，单击 Display... 按钮，在视图窗口中即可以看到网格情

况，如图 5-22 所示。

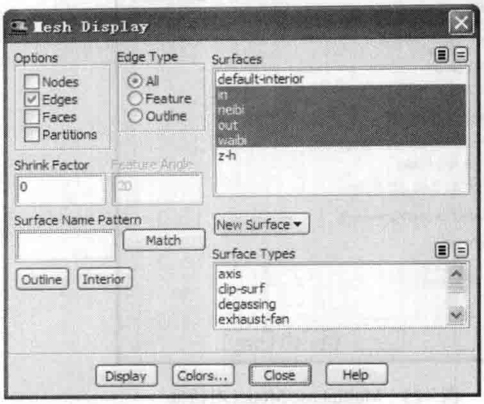


图5-21　Mesh Display 对话框

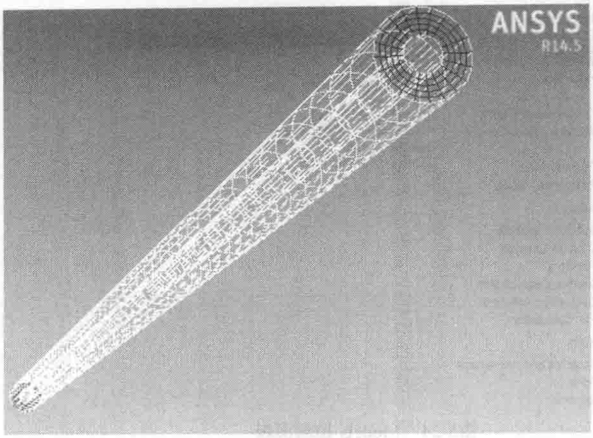


图5-22　网格显示

注意：用户在开始计算设置前，应先检查网格质量，若出现负体积将无法迭代计算。若视图窗口中没有网格显示，应尽量显示网格后并查看，然后进行下一步设置。这里没有选择 Surfaces 栏中的 default-interior，是因为内部网格较多，显示需要较长的反应时间，计算机内存不够时容易死机，而表面网格能够代表内部网格，因此不建议选择 default-interior。

4. 单击 General 控制面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，从图 5-23 所示的对话框中可以看到计算区域的尺寸范围。

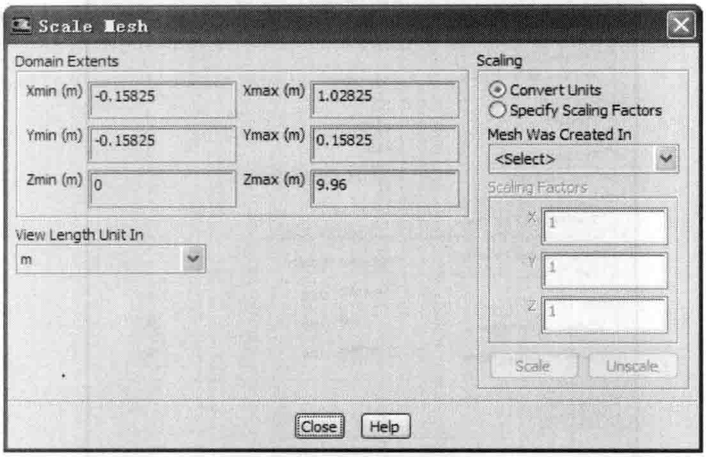


图5-23　Scale Mesh 对话框

5. 下面定义本例所用到的模型。首先单击左侧控制树中的 Models，如图 5-24 所示，在中间的 Models 控制面板中双击 Multiphase-Off，弹出 Multiphase Model 对话框，如图 5-25 所示。在 Multiphase Model 对话框中，选中 Model 下的 Eulerian 单选按钮，并设置右侧 Number of Eulerian Phases 为 2，选择 Scheme 为 Implicit，单击 OK 按钮关闭该对话框。

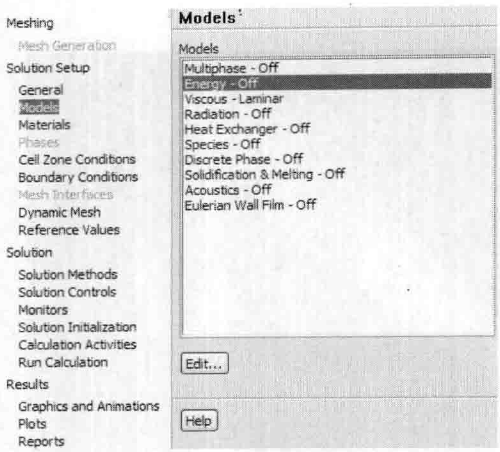


图5-24　Models 控制面板

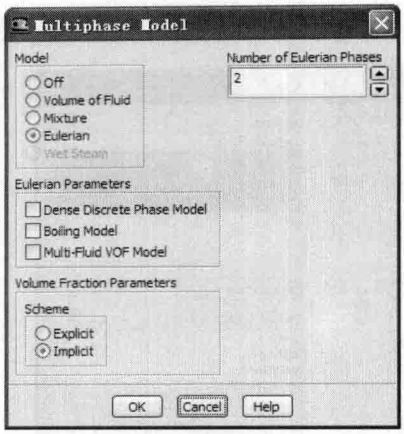


图5-25　Multiphase Model 对话框

6. 由于是高速携岩流体，雷诺数较大，属于湍流流动，这里需要设置湍流模型。在中间 Models 控制面板中双击 Viscous - Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 5-26 所示。在该对话框中，选中 Model 下的 k-epsilon (2 eqn)单选按钮，在 k-epsilon Model 选项下选中 Standard 单选按钮，在 Near-Wall Treatment 中选中 Standard Wall Functions（标准壁面函数）单选按钮，在 Turbulence Multiphase Model 中选中 Mixture 单选按钮，模型参数保持默认设置，单击 OK 按钮。

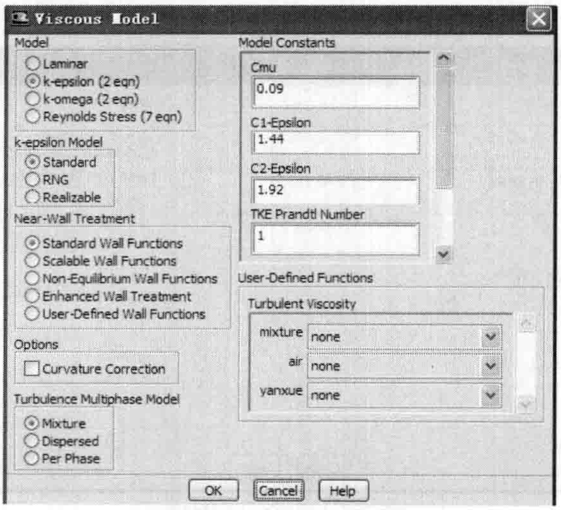


图5-26　Viscous Model 对话框

7. 由于气体在井下的密度要高于标准密度，这里定义其为 10kg/m^3，故需单击左侧控制树中的 Materials，在中间的 Materials 控制面板中单击 Create/Edit... 按钮，弹出图 5-27 所示的 Create/Edit Materia 对话框。在 Properties 下方的 Density (kg/m^3)中将数值改为 10，类型保持为 constant（常数），其余参数不变，单击 Change/Create 按钮，完成空气密度的修改。

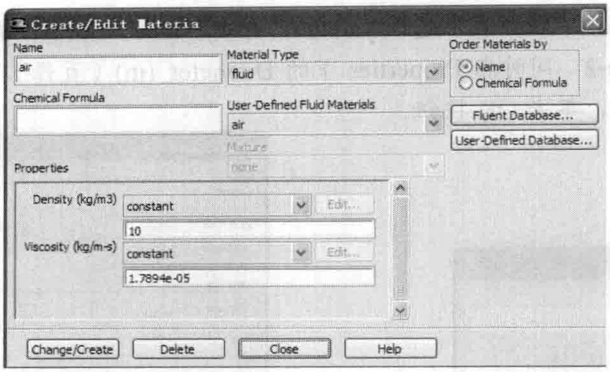


图5-27　Create/Edit Materia 对话框

8. 接着定义岩屑材料。单击 Create/Edit Materia 对话框右侧的 User-Defined Database... 按钮，弹出图 5-28 所示的 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入“new materials”，然后单击 Browse... 按钮，弹出图 5-29 所示的 User-Defined Database Materials 对话框。在 User-Defined Database Materials 对话框中定义岩屑的类型为 fluid（多相流模型中的固相需要定义为流体类型），名称为 yanxue，物性参数如图 5-29 所示。单击 Save 和 Copy 按钮，将定义好的岩屑保存在自定义材料数据库中，并导入到当前工程中进行计算。完后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。回到 Materials 控制面板中，即会发现在 Materials 的 Fluid 下拉列表中存在了空气和岩屑两种材料。

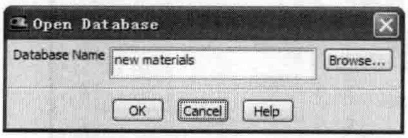


图5-28　Open Database 对话框

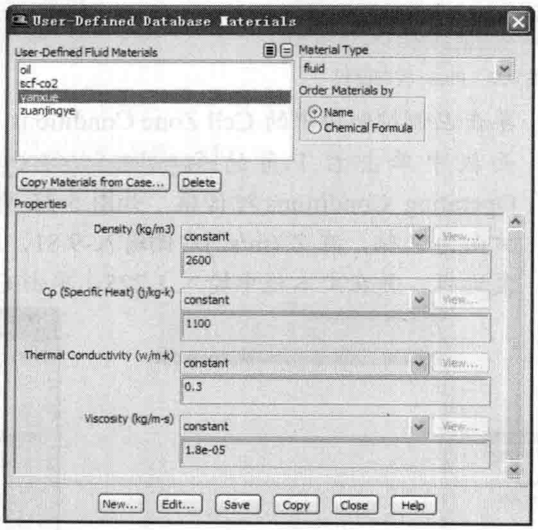


图5-29　User-Defined Database Materials 对话框

9. 定义基本相和第二相。单击左侧控制树中的 Phases，在中间的 Phases 控制面板中，可以看到 Primary-phase 和 Secondary-phase 两项。首先双击 Primary-phase，弹出 Primary Phase 对话框，如图 5-30 所示。在其 Phase Material 下拉列表中选择 air，并修改 Name 为 air，单击 OK 按钮。然后回到 Phases 控制面板中，双击 Secondary-phase，弹出图 5-31 所示的 Secondary Phase 对话框。在

Phase Material 下拉列表中选择 yanxue，并在 Name 文本框中输入 yanxue 代替原来的 phase-2，同时在 Properties 下的 Diameter (m)（直径）中输入岩屑颗粒直径为 0.001，单击 OK 按钮。

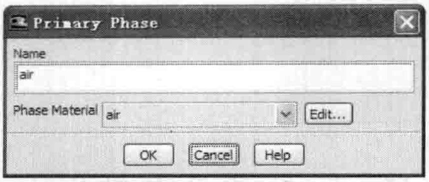


图5-30 Primary Phase 对话框

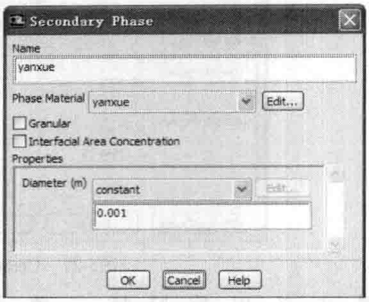


图5-31 Secondary Phase 对话框

10. 如图 5-32 所示，回到 Phases 控制面板，单击 Interaction... 按钮，弹出 Phase Interaction 操作面板，如图 5-33 所示。选择 Drag Coefficient 中的 schiller-naumann，定义岩屑和空气之间使用 schiller-naumann 来计算相间阻力。单击 OK 按钮，关闭 Phase Interaction 对话框。

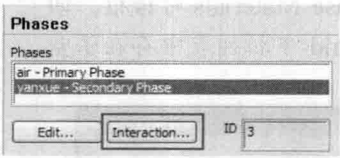


图5-32 Phase 控制面板

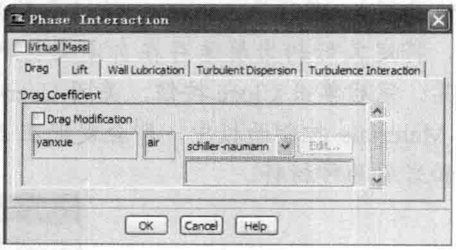


图5-33 相间阻力定义

11. 单击左侧控制树中的 Cell Zone Conditions，在中间的 Cell Zone Conditions 控制面板中单击右下角的 Operating Conditions... 按钮，如图 5-34 所示。弹出 Operating Conditions 对话框，如图 5-35 所示，选中 Gravity 复选框，指定重力方向为 Z 轴，在 Z (m/s2)右侧输入-9.81，同时选中 Specified Operating Density 复选框，并在文本框中输入 1.225，单击 OK 按钮。

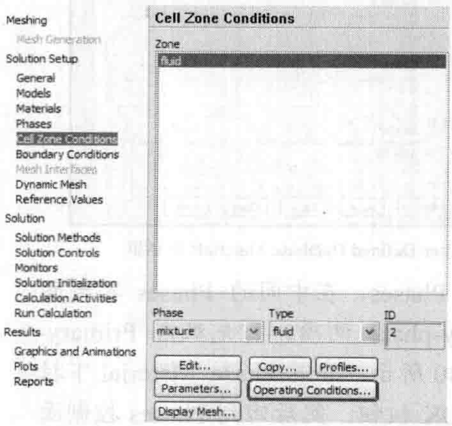


图5-34 Cell Zone Conditions 控制面板

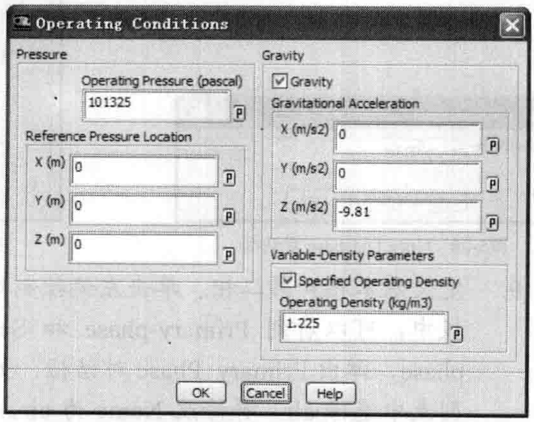


图5-35 Operating Conditions 对话框

12. 完成上述操作后，开始定义边界条件。单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在中间的 Boundary Conditions 控制面板中可以看到在 Gambit 中定义好的边界条件名称（in、neibi、out 和 waibi），如图 5-36 所示。首先在 Zone 中选中 in，保持 Phase 为 mixture，单击 Edit... 按钮，弹出图 5-37 所示的 Velocity Inlet 对话框。在其中选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity (%)中输入 10，在 Hydraulic Diameter (m)中输入 0.1895（环空外径减去内径），单击 OK 按钮。

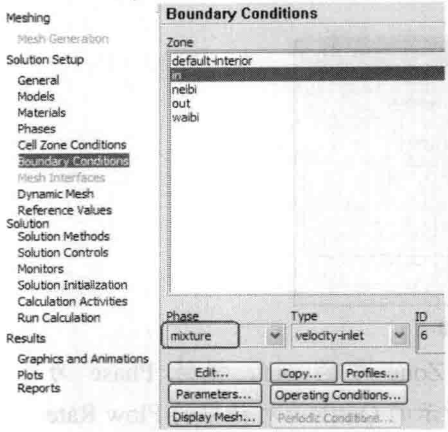


图5-36 边界条件设置

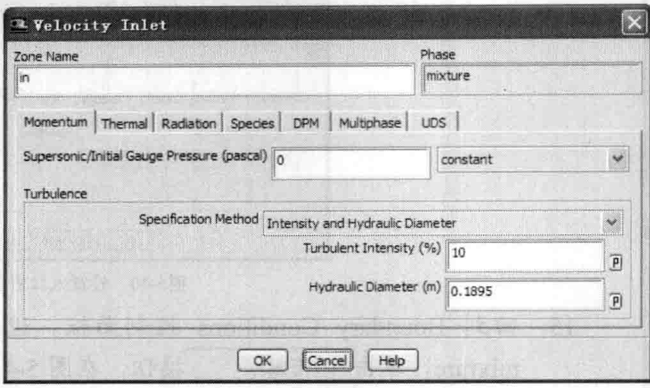


图5-37 Velocity Inlet 对话框

13. 回到 Boundary Conditions 控制面板，仍选择 Zone 下的 in，改变 Phase 为 air，单击 Edit... 按钮，在图 5-38 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Velocity Specification Method 下拉列表中的"Magnitude, Normal to Boundary"，并保持 Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity Magnitude (m/s)中输入 25，单击 OK 按钮。

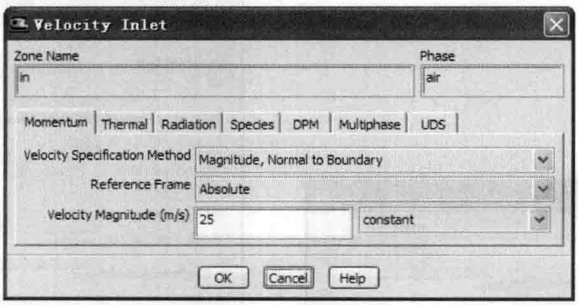


图5-38 设置空气速度

14. 再回到 Boundary Conditions 控制面板，仍选择 Zone 下的 in，改变 Phase 为 yanxue，单击 Edit... 按钮，在图 5-39 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Velocity Specification Method 下拉列表中的"Magnitude, Normal to Boundary"，并保持 Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity Magnitude (m/s) 中输入 15；另外，由于速度入口岩屑的体积分数为 0.02，所以这里需要单击对话框中的 Multiphase 选项卡，在 Volume Fraction 中输入 0.02，如图 5-40 所示，单击 OK 按钮。

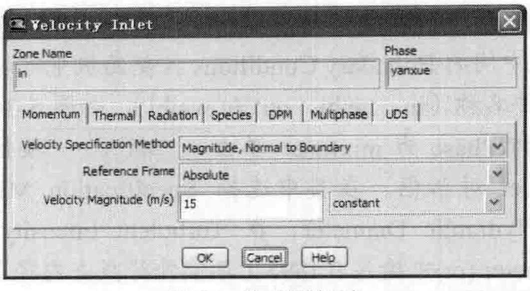


图5-39 设置岩屑速度

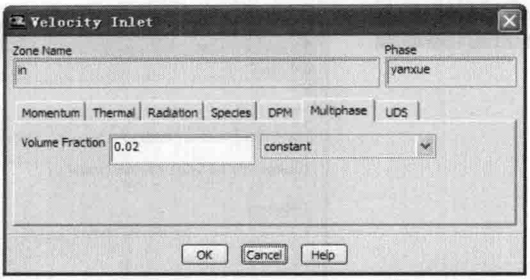


图5-40 设置入口岩屑含量

15. 回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 中的 out，保持 Phase 为 mixture，单击 Edit... 按钮，在图 5-41 所示的 Outflow 对话框的 Flow Rate Weighting 中输入 1，即表示进入的流体均从该出口流出，单击 OK 按钮。
16. 回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 中的 neibi，保持 Phase 为 mixture，单击 Edit... 按钮，弹出图 5-42 所示的 Wall 对话框。在对话框的 Wall Roughness 下方的 Roughness Height (m)中输入 0.00004678，保持 Roughness Constant 为 0.5，单击 OK 按钮。

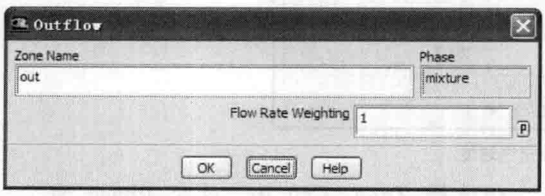


图5-41 Outflow 对话框

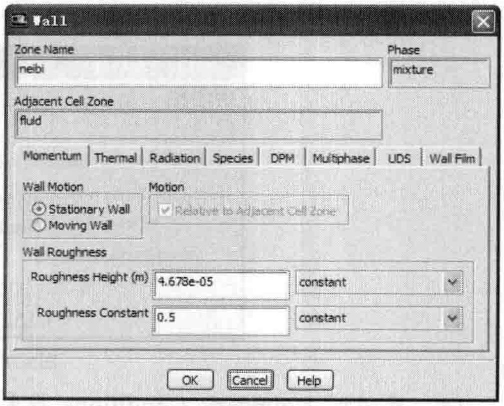


图5-42 Wall 对话框

17. 采用同样的操作，定义 waibi（外壁面）的粗糙度也为 0.00004678。
18. 边界定义好后，在左侧控制树中单击 Solution Methods，中间区域即出现 Solution Methods 控制面板，如图 5-43 所示。用户可以在该面板中设置压力-速度耦和求解方式，动量、体积分数、湍动能、湍动能耗散率等参数的差分形式等。这里保持默认设置，不做改动。

19. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，可以看到中间控制面板中各参数的松弛因子，如图 5-44 所示，这里不做改动，保持默认设置。

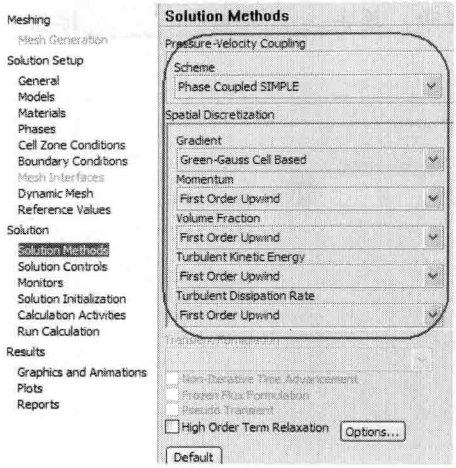


图5-43 Solution Methods 控制面板

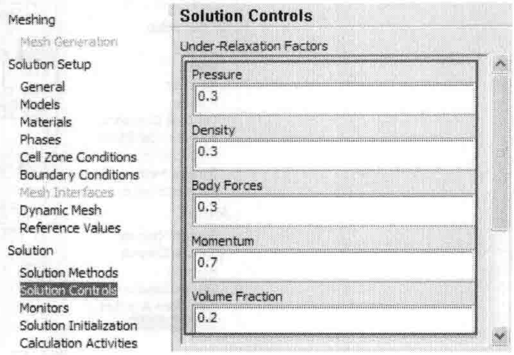


图5-44 Solution Controls 控制面板

20. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 in，如图 5-45 所示。这时 Initial Values 中的值会有所变化，空气在 Z 方向的速度初始值被设为 25m/s。保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

21. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的“Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框，如图 5-46 所示。在 Residual Monitors 对话框选中 Plot 复选框，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。

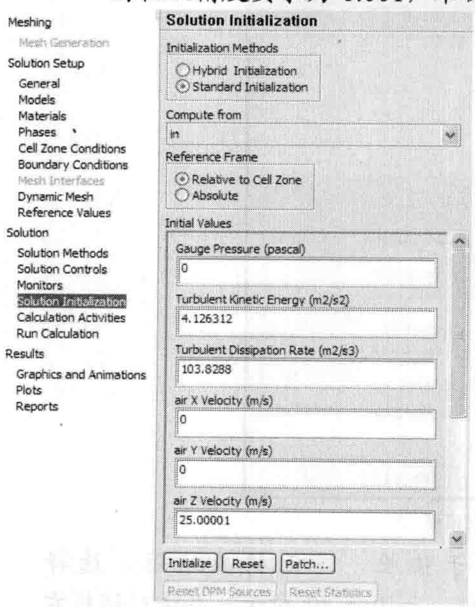


图5-45 初始化

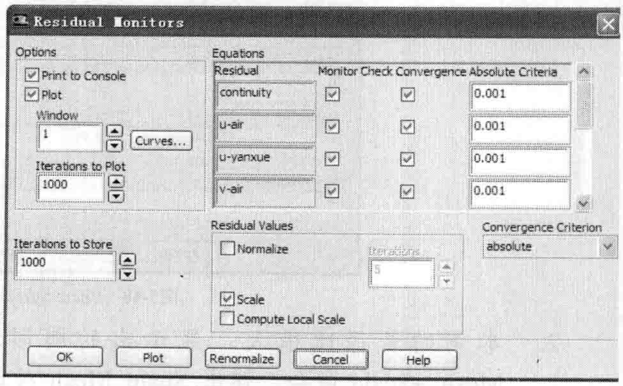


图5-46 Residual Monitors 对话框

22. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 5-

2.cas。

23. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 按钮开始计算，如图 5-47 所示。

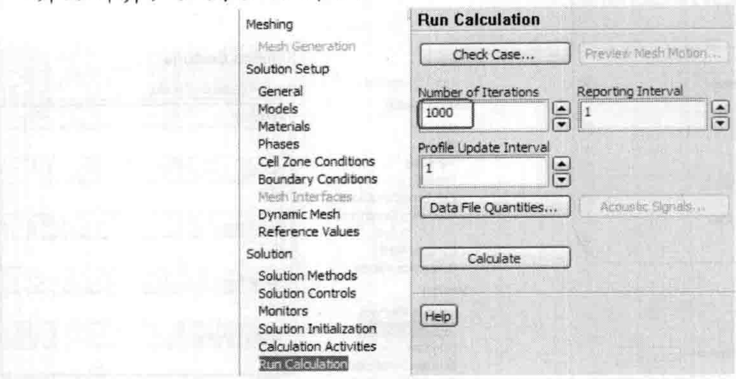


图5-47　计算步数

5.2.5 结果后处理与分析

1. 迭代结束后，为显示由下而上过程中流场的变化，需要定义轴向剖面。选择 Surface→Plane 命令，弹出图 5-48 所示的 Plane Surface 对话框。在 Points 下的三点坐标中分别输入 x0 (m)、y0 (m)、z0 (m)为 0、0、0，x1 (m)、y1 (m)、z1 (m)为 0、0、9.96，x2 (m)、y2 (m)、z2 (m)为 1、0、9.96，并在 New Surface Name 中输入 z-h，单击 Create 按钮生成轴向剖面。

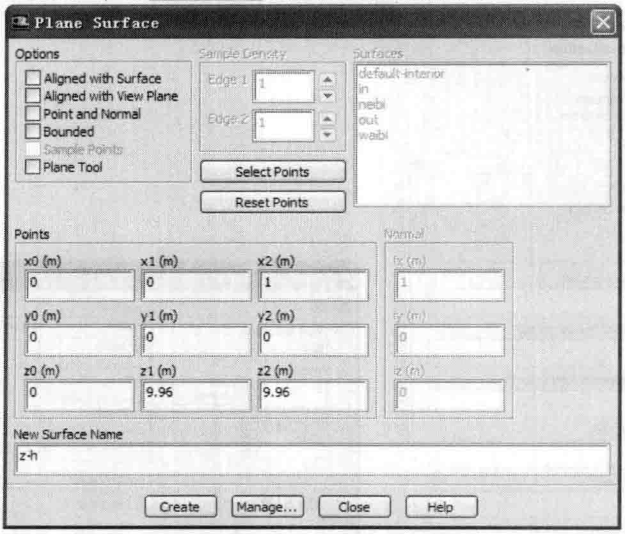


图5-48　Plane Surface 对话框

2. 本例的长径比很大，显示出的图形过于狭长，下面将其缩短。选择 Mesh→Scale 命令，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 5-49 所示。在该对话框右下角 Scaling Factors 中的 Z 中输入 0.1，单击 Scale 按钮，使得轴向长度缩

小到原来的 0.1。然后单击 Close 按钮，退出该对话框。

3. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，如图 5-50 所示，在中间 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 5-51 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Surfaces 为定义的轴向剖面 z-h，然后选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure 和 Static Pressure，保持 Phase 下拉列表中的 mixture，并选中 Options 下方的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，得到图 5-52 所示的压强分布云图。

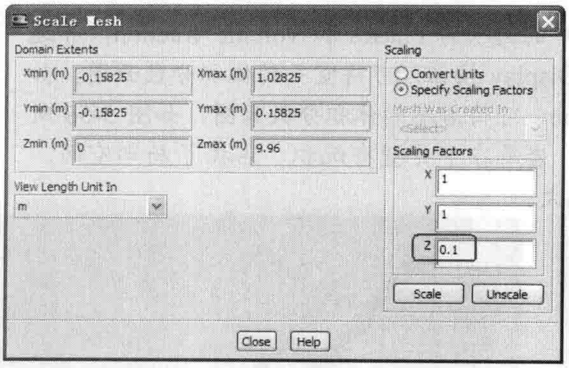


图5-49 Scale Mesh 对话框

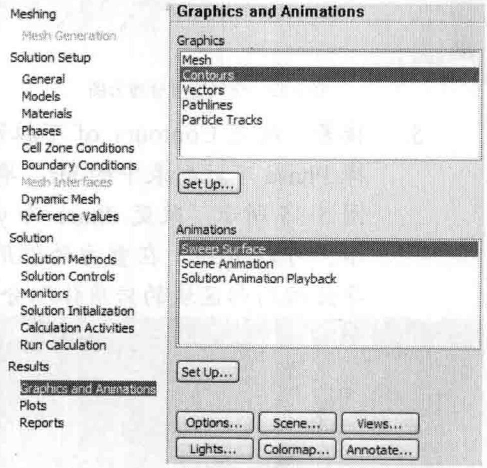


图5-50 结果显示控制面板

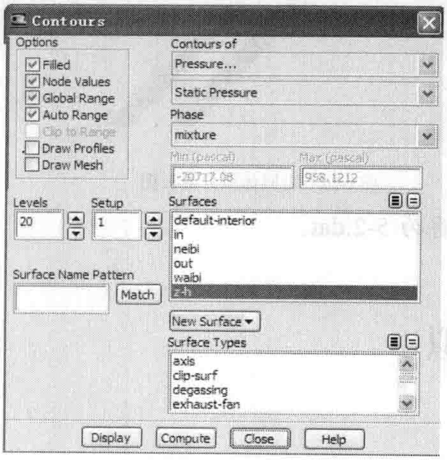


图5-51 Contours 对话框

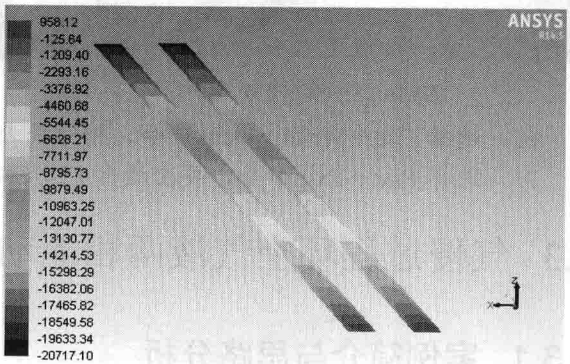


图5-52 压强分布云图

4. 改变 Contours of 下拉列表中的选项，选择为 Velocity 和 Velocity Magnitude，并选择 Phase 下拉列表中的 air，单击 Display 按钮，可得空气的速度分布云图，如图 5-53 所示。改选 Phase 下拉列表中的选项为 yanxue，单击 Display 按钮，可得岩屑的速度分布云图，如图 5-54 所示。可见，空气与岩屑的速度大小不一样，两者之间存在速度差。但空气与岩屑的速度分布趋势一样，空气速度大的区域对应的岩屑速度也较大。

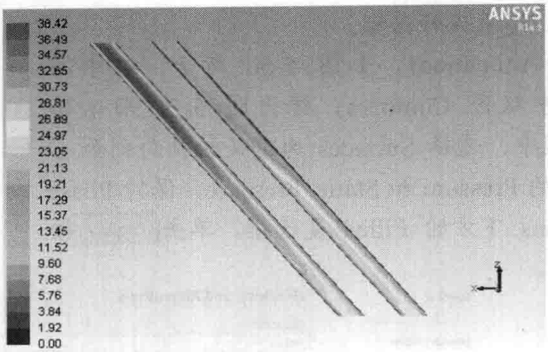


图5-53　空气速度分布云图

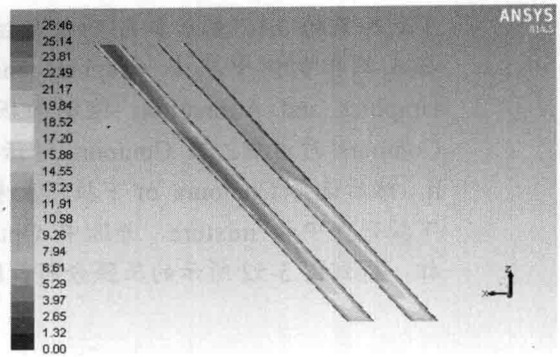


图5-54　岩屑速度分布云图

5. 接着，改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Phases 和 Volume fraction，并选择 Phase 下拉列表中的 air，单击 Display 按钮，可得空气的体积分数云图，如图 5-55 所示。改变 Phase 为 yanxue，可得岩屑的体积分数云图，如图 5-56 所示。可以看到，在重力的作用下，岩屑在下井壁有沉积，占据了局部空间，导致该局部区域的岩屑体积分数偏大。

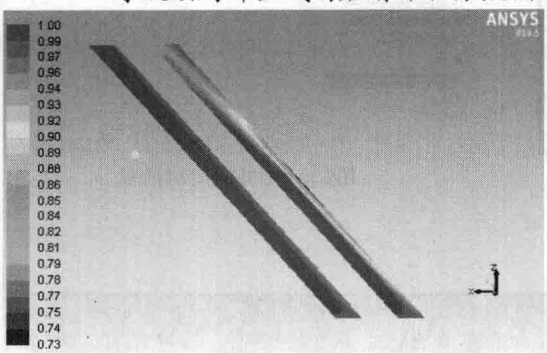


图5-55　空气体积分数云图

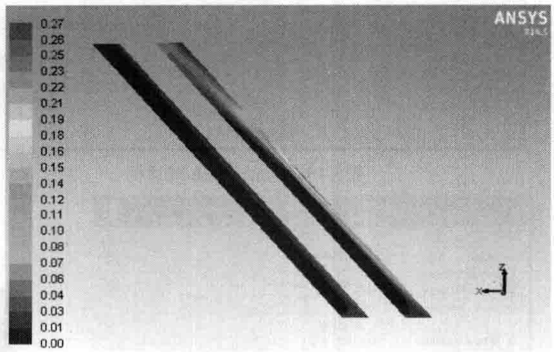


图5-56　岩屑体积分数云图

6. 选择 File→Write→Data 命令，将结果文件保存为 5-2.dat。
7. 选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

5.3　气侵过程环空气液两相流动模拟

5.3.1　案例简介与思路分析

钻井过程中，储层气体侵入井眼后将与钻井液在环空中形成气液两相流，若控制不好，极易诱发井涌或井喷，尤其是含 CO_2、H_2S 等酸性气体的侵入，对储层、钻井装置与人的生命安全都构成了巨大的威胁。基于计算流体动力学方法，采用 FLUENT 软件的瞬态 VOF 模型对气侵过程环空气液两相流场进行数值模拟研究，可以得出不同气侵条件及气侵发生前后的环空流体流动规律，并可给出气侵的动态过程、气液两相流型及各组分气体的分布情况。数值模拟计算结果可为安全有效地井控及垂直上升管内气液两相流的研究提供一定的参考依据。

【案例简介】

依据川东北某气井的井身结构，井眼为 215.9mm，钻杆外径为 127mm。取 10m 长的环空井段作为计算区域，建立二维几何模型，如图 5-57 所示。模拟用钻井泥浆为幂律流体，密度为 1200kg/m^3，流性指数 n 为 0.71，稠度系数 k 为 0.59Pa·s^n，质量流量为 1.88kg/s，气侵流量取为 0.008kg/s，为纯天然气组分，假设为 100%CH_4。

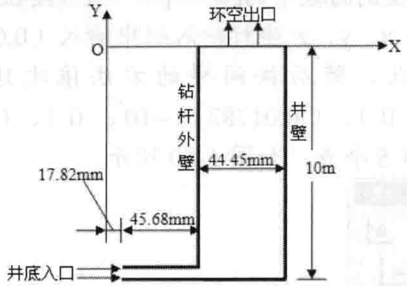


图5-57 气侵模型示意图

【思路分析】

本例为二维的气液两相流动模拟，模型简单，可采用 Gambit 软件进行建模与网格划分。由于泥浆为非牛顿流体的幂律流体，需要定义新材料。为了能够捕捉气侵过程中的流型，选用 FLUENT 多相流模型中的 VOF 模型模拟气液两相流，以使得气液界面不断重构。具体操作流程如图 5-58 所示。

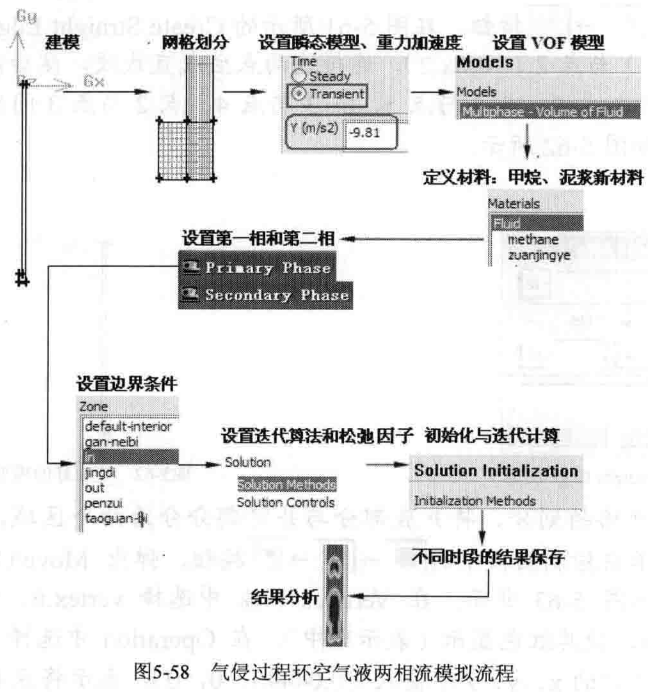


图5-58 气侵过程环空气液两相流模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch5\5-3.msh、5-3.cas、5-3-0.3s.dat、5-3-0.6s.dat、5-3-0.9s.dat、5-3-1.2s.dat、5-3-1.5s.dat、5-3-1.7s.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch5\5-3.avi”文件。

5.3.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，在图 5-59 所示的 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0.0635，0，0），单击 Apply 按钮生成第一个点，随后按同样的方法依次建立（0.10795，0，0）、（0.10795，–10，0）、（0.01782，–10，0）、（0.01782，–9.9，0）和（0.0635，–9.9，0）5 个点，如图 5-60 所示。

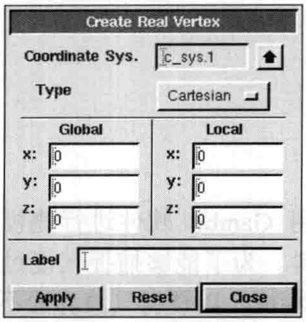


图5-59 Create Real Vertex 面板

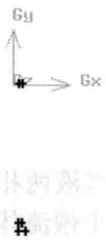


图5-60 建立的模型端点

2. 单击 → → 按钮，在图 5-61 所示的 Create Straight Edge 面板中选择点 1（vertix.1）与点 2（vertix.2），连接这两点生成直线段，然后依次建立点 1 与点 6、点 5 与点 6、点 4 与点 5、点 3 与点 4、点 2 与点 3 间的线段，共 6 根直线段，如图 5-62 所示。

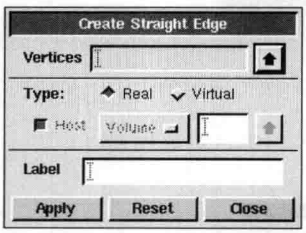


图5-61 Create Straight Edge 面板



图5-62 建立好的模型线段

3. 为了便于网格的划分，将井底部分与井筒部分分为两个区域，需要建立两个辅助点。单击控制面板中的 → → 按钮，弹出 Move/Copy Vertices 操作面板，如图 5-63 所示。在 Vertices Pick 中选择 vertex.6，然后单击下方的 Copy 按钮，使其红色显示（表示选中）。在 Operation 中选择 Translate，代表平移。在下方的 x、y、z 中输入（0.04445，0，0），表示将点 6 在向 X 轴正向平移 0.04445 的位置复制出一个点。单击 Apply 按钮，即复制出该点，为 vertex.7，如图 5-64 所示。

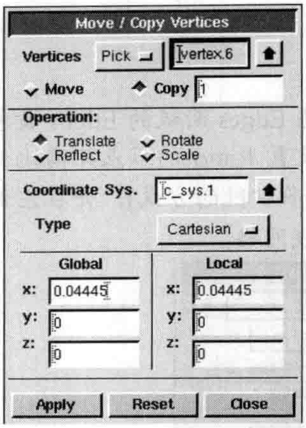


图5-63 Move/Copy Vertices 操作面板

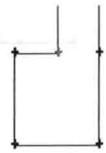


图5-64 复制出的点

4. 按照同样的方式，再建立一个辅助点。同样选择 vertex.6 为源点，在 Move/Copy Vertices 操作面板中选择 Copy，在下方的 x、y、z 中输入（0、–0.1、0），单击 Apply 按钮，生成点 8（vertex.8）。
5. 单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中选择点 6 与点 7，连接这两点生成直线段。采用同样的方法，连接点 6 与点 8 之间的线段。
6. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，如图 5-65 所示。在 Edge 中选择 edge.6，在 Split With 右侧选择 Vertex，即用现有的点来分割线段 6。在 Vertex 中选择刚建立的辅助点 vertex.7，单击 Apply 按钮即实现用点 7 分割线段 6，从而生成一根新的线 edge.9。采用同样的方法，选择 edge.5，用辅助点 vertex.8 来分割，从而生成一根新的线 edge.10。
7. 接下来生成模型需要的面。单击 → → 按钮，在图 5-66 所示的 Create Face from Wireframe 面板中完成需要创建的面，本例要创建三个面。在 Edges 右侧的黄框中单击一下，然后按住 Shift 键，单击线段 6（edge.6）、线段 7、线段 9、线段 10，单击 Apply 按钮生成第一个面 face.1。然后，单击线段 3、线段 4、线段 5、线段 6，生成第二个面 face.2，face.1 和 face.2 代表井底区域。采用同样的方式选择线段 1、线段 2、线段 7、线段 8，生成第三个面 face.3，代表井筒区域。

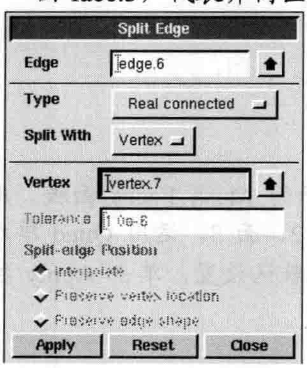


图5-65 Split Edge 操作面板

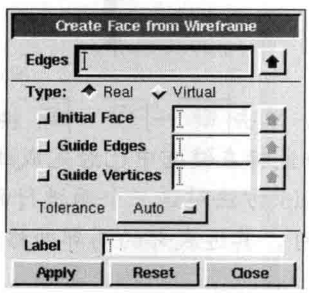


图5-66 Create Face from Wireframe 面板

5.3.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在图 5-67 所示的 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中线段 4（edge.4）、线段 6 和线段 9，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式(即将线段等分为多少段的方式)，并在左侧输入栏中输入 10，单击 Apply 按钮生成这三条线的线网格。

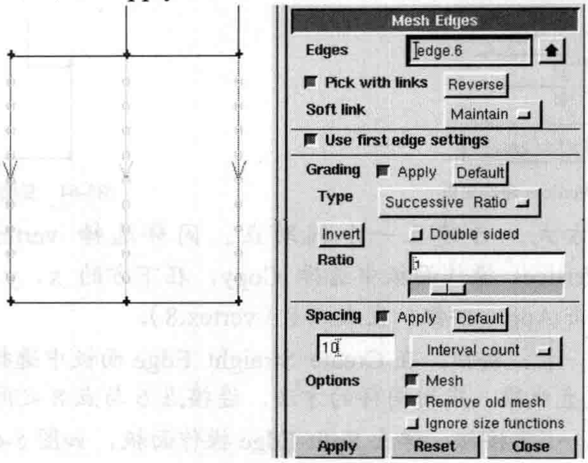


图5-67 Mesh Edges 面板

2. 按照同样的方法，将线段 3 和线段 5 分为 6 段，将线段 1、线段 7 和线段 10 均分为 10 段，将线段 2 和线段 8 等分为 99 段。划分好的线网格如图 5-68 所示。

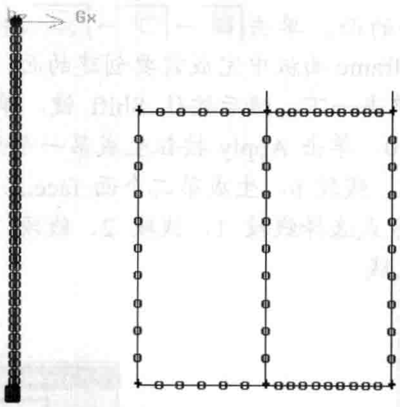


图5-68 划分好的线网格

3. 然后，单击 → → 按钮，打开图 5-69 所示的 Mesh Faces 面板。用 Shift+鼠标左键选中已经完成线网格划分的面 1、面 2、面 3，运用 Quad 单元与 Map 方法对这三个面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可，其近底部的局部网格如图 5-70 所示。

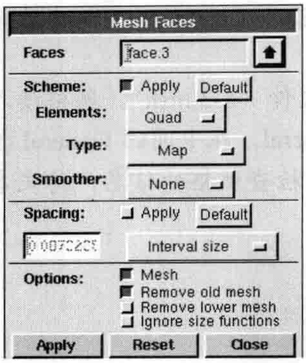


图5-69　Mesh Faces 面板

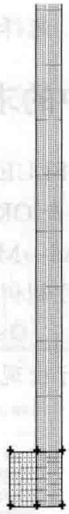


图5-70　近底部局部网格

4. 网格划分好后，需要定义边界类型。单击 → 按钮，在图 5-71 所示的 Specify Boundary Types 面板中，在 Edges 右侧黄色输入框中选择线段 4，在 Type（边界类型）中选择 VELOCITY_INLET（速度入口），在 Name 输入框中输入 in（代表名称），单击 Apply 按钮，即将线段 4 定义为速度入口，名称为 in。
5. 采用同样的方式，将线段 5、10 定义为壁面边界（WALL），名称为 jingdi；将线段 2 定义为壁面边界，名称为 gan-neibi；将线段 3 定义为壁面边界，名称为 penzui；将线段 6、8 定义为壁面边界，名称为 taoguan-bi；将线段 1 定义为压力出口（PRESSURE_OUT），名称为 out。建好的井底部分的边界条件如图 5-72 所示。

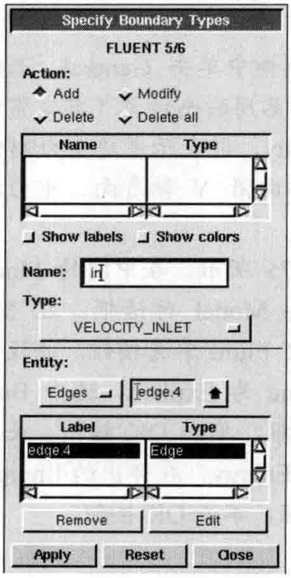


图5-71　Specify Boundary Types 面板

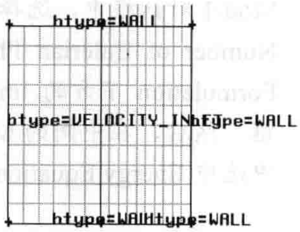


图5-72　井底部分的边界条件

6. 网格划分完后，选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 5-3.msh。

5.3.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 执行 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件“5-3.msh”。网格读入之后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，如图 5-73 所示，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。

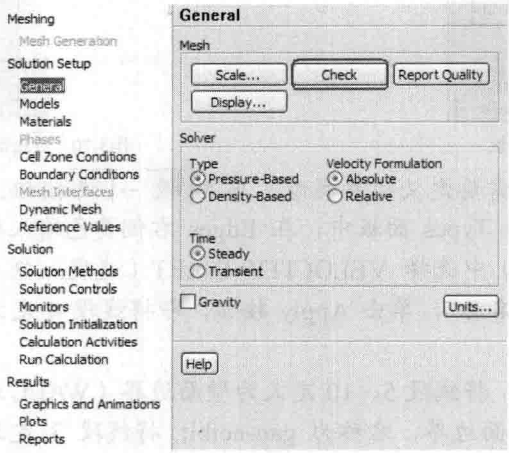


图5-73 检查网格

3. 单击 General 控制面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，从 Scale Mesh 对话框中可以看到计算区域的尺寸范围。
4. 下面定义本例所用到的模型，首先在左侧控制树中单击 General，选择中间控制面板中 Time 下的 Transient 单选按钮，表示启用瞬态计算（非定常计算或非稳定计算），如图 5-74 所示。然后选中 Gravity，即表示考虑重力影响。在 Y (m/s2)右侧输入框中输入–9.81，即表示重力方向沿 Y 轴负向，重力加速度为 9.81m/s^2。
5. 接着，单击左侧控制树中的 Models，如图 5-75 所示，在中间的 Models 控制面板中双击 Multiphase-Off，弹出 Multiphase Model 对话框。在 Multiphase Model 对话框中，选择 Model 下的 Volume of Fluid 单选按钮，并设置右侧的 Number of Eulerian Phases 为 2，选择 Scheme 为 Explicit，选中 Body Force Formulation 下方的 Implicit Body Force 复选框，单击 OK 按钮，关闭该对话框。然后，在中间的 Models 控制面板中双击 Energy，在弹出的 Energy 对话框中选中 Energy Equation 复选框，启用能量方程，单击 OK 按钮。

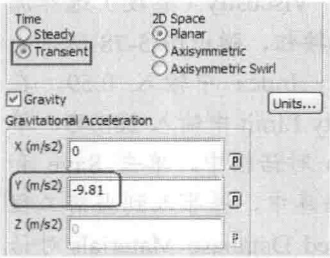


图5-74 非定常模型启用与重力设置

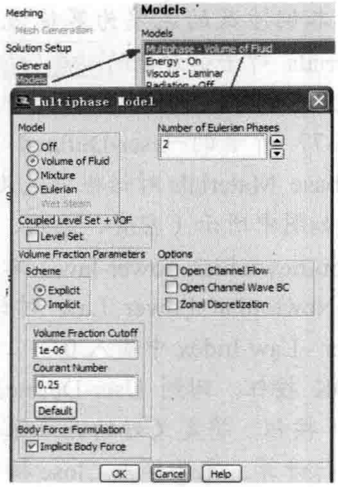


图5-75 VOF 模型设置

6. 单击左侧控制树中的 Materials，在中间的 Materials 控制面板中单击 Create/Edit... 按钮，弹出图 5-76 所示的 Create/Edit Materials 对话框。单击对话框中的 Fluent Database... 按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的甲烷，单击 methane (ch4)，即会在下方的 Properties 中出现相应物理属性的数据，如密度为 0.6679kg/m^3 等。单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料——甲烷复制到当前工程中。单击 Close 按钮关闭 Fluent Database Materials 面板。

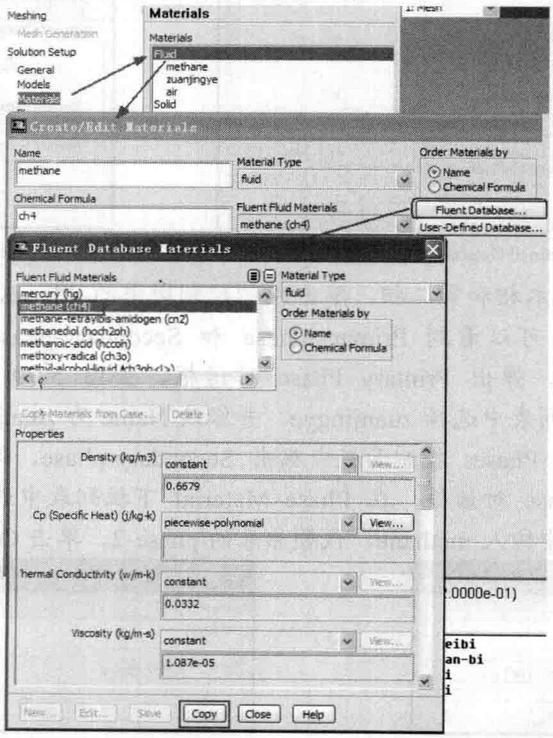


图5-76 甲烷材料选择

7. 由于本例涉及的泥浆为幂律流体，所以需要定义新材料。单击 Create/Edit Materials 对话框右侧的 User-Defined Database... 按钮，弹出 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入“new materials”，然后单击 Browse... 按钮，弹出图 5-77 所示的 User-Defined Database Materials 对话框。在 User-Defined Database Materials 对话框中定义泥浆的类型为 fluid，名称为 zuanjingye，物性参数如图中所示（密度、比热、导热系数等）。其中 Viscosity（黏度）选择满足 non-newtonian-power-law，单击其右侧的 View... 按钮，弹出图 5-78 所示的 Non-Newtonian Power Law 对话框，在 Consistency Index 中输入 0.59，在 Power –Law Index 中输入 0.71，在 Minimum Viscosity Limit 中输入 288.43，单击 OK 按钮。回到 User-Defined Database Materials 对话框中，单击 Save 和 Copy 按钮，将定义好的泥浆保存在自定义材料数据库中，并导入到当前工程中进行计算。完后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。回到 Materials 控制面板中，即会发现在 Materials 的 Fluid 下拉列表中存在了甲烷和泥浆两种材料。

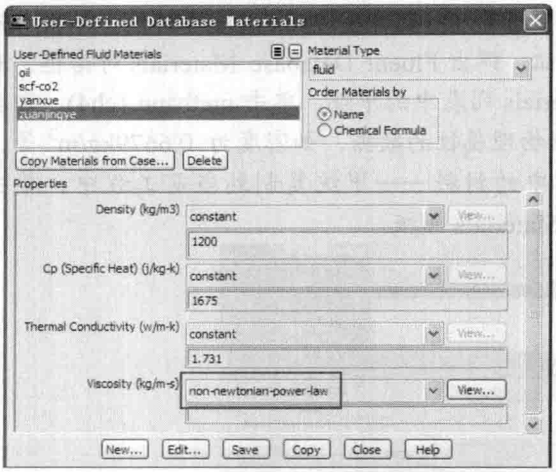


图5-77　User-Defined Database Materials 对话框

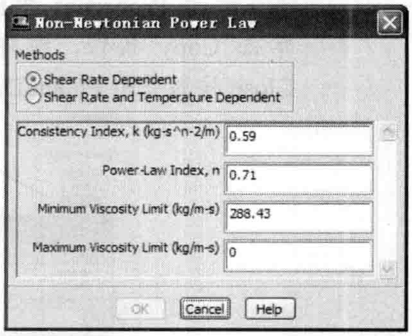


图5-78　Non-Newtonian Power Law 对话框

8. 然后，定义基本相和第二相，单击左侧控制树中的 Phases，在中间的 Phases 控制面板中，可以看到 Primary-phase 和 Secondary-phase 两项。首先双击 Primary-phase，弹出 Primary Phase 对话框，如图 5-79 所示。在其 Phase Material 下拉列表中选择 zuanjingye，并修改 Name 为 zuanjingye，单击 OK 按钮。然后回到 Phases 控制面板中双击 Secondary-phase，弹出图 5-80 所示的 Secondary Phase 对话框。在 Phase Material 下拉列表中选择 methane，并在 Name 文本框中输入 methane，代替原来的 phase-2，单击 OK 按钮。

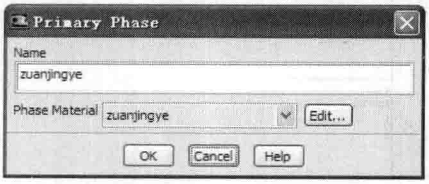


图5-79　Primary Phase 对话框

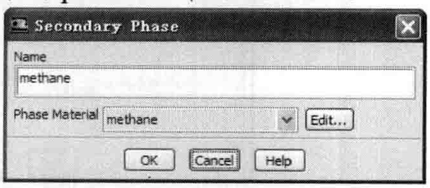


图5-80　Secondary Phase 对话框

9. 单击左侧控制树中的 Cell Zone Conditions，在中间的 Cell Zone Conditions 控制面板中单击右下角的 Operating Conditions... 按钮，弹出 Operating Conditions 对话框，这里保持背景压强为 101325Pa，单击 OK 按钮。

10. 接下来定义边界条件。单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在中间的 Boundary Conditions 控制面板中可以看到在 Gambit 中定义好的边界条件名称（in、jingdi、gan-neibi、penzui、taoguan-bi、out），如图 5-81 所示。首先在 Zone 中选中 in，保持 Phase 为 mixture，将 Type 改为 mass-flow-inlet，单击 Edit... 按钮，弹出 Mass-Flow Inlet 对话框。在 Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)输入框中输入 100000，单击 OK 按钮。

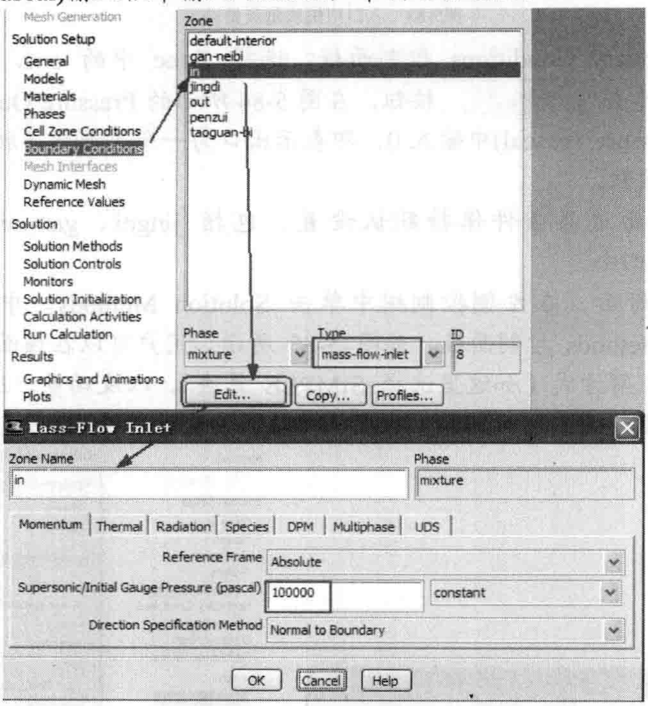


图5-81　入口边界设置

11. 回到 Boundary Conditions 控制面板，仍选择 Zone 下的 in，改变 Phase 为 zuanjingye，单击 Edit... 按钮，在图 5-82 所示的 Mass-Flow Inlet 对话框中，在 Mass Flow Rate (kg/s)中输入 1.88，单击 OK 按钮。

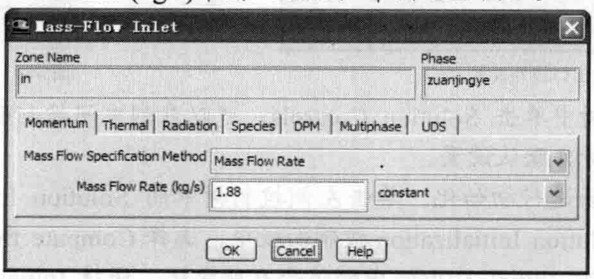


图5-82　入口泥浆质量流量设置

12. 回到 Boundary Conditions 控制面板，仍选择 Zone 下的 in，改变 Phase 为

methane，单击 Edit... 按钮，在图 5-83 所示的 Mass-Flow Inlet 对话框中，在 Mass Flow Rate (kg/s)中输入 0.008，单击 OK 按钮。

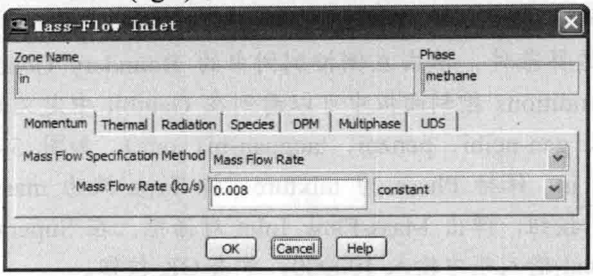


图5-83　入口甲烷质量流量设置

13. 回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 中的 out，保持 Phase 为 mixture，单击 Edit... 按钮，在图 5-84 所示的 Pressure Outlet 对话框中的 Gauge Pressure (pascal)中输入 0，即表示出口为一个大气压（相对压强为 0），单击 OK 按钮。
14. 其余的壁面边界条件保持默认设置，包括 jingdi、gan-neibi、penzui 和 taoguan-bi 四个。
15. 边界定义好后，在左侧控制树中单击 Solution Methods，中间区域即出现 Solution Methods 控制面板，如图 5-85 所示。用户可以在该面板中设置压力-速度耦和求解方式（如这里选择 SIMPLE 算法），以及动量、压强、密度、体积分数等参数的差分形式等。这里保持默认设置，不做改动。

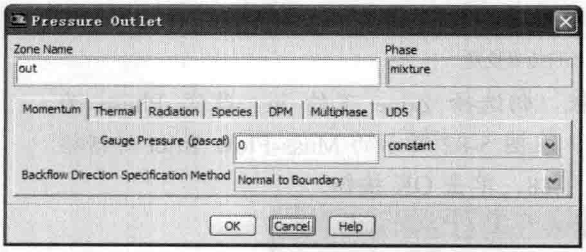


图5-84　出口边界设置

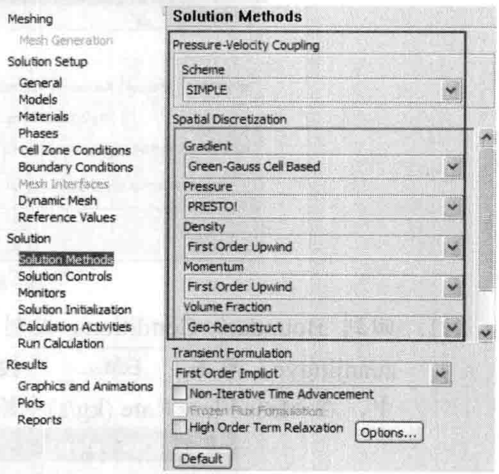


图5-85　求解方法

16. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，可以看到中间控制面板中各参数的松弛因子，保持其默认设置。
17. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 in，如图 5-86 所示，这时 Initial Values 中的值会有所变化。保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮，完成初始化。
18. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的“Residuals-

Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框，如图 5-87 所示。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot 复选框，以打开残差曲线图。这里 energy 的收敛精度为 1e-6，其余参数的收敛精度为 0.001，单击 OK 按钮。

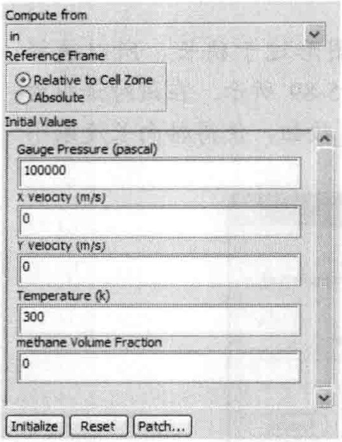


图5-86　初始化

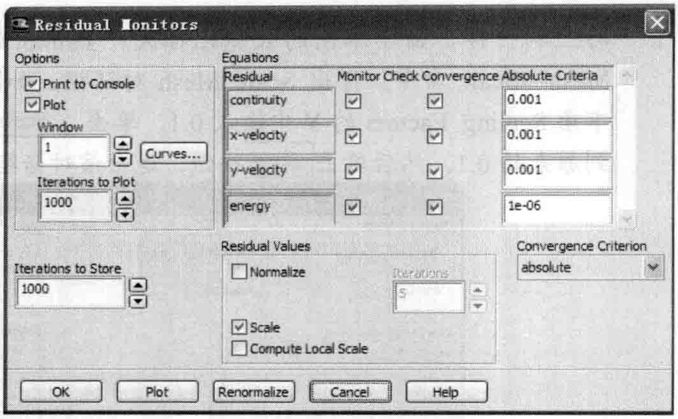
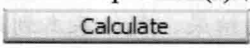


图5-87　监视设置

19. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 5-3.cas。

20. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Time Stepping Method 为 Fixed（即时间步长恒定），如图 5-88 所示，在 Time Step Size (s)中输入 0.001，在 Number of Time Steps 中输入 300，单击 

按钮开始解算。

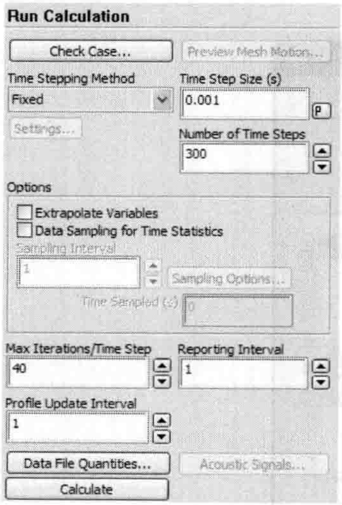


图5-88　计算步数设置

21. 计算完 300 步后，即代表气侵发生了 0.3s，选择 File→Write→Data 命令，将结果文件保存为 5-3-0.3s.dat。

22. 接着再连续计算 4 个 300 步，分别对应时间 0.6s、0.9s、1.2s、1.5s，并保存结果文件为 5-3-0.6s.dat、5-3-0.9s.dat、5-3-1.2s.dat、5-3-1.5s.dat。然后，再算

200 步，对应时间 1.7s，保存数据文件为 5-3-1.7s.dat。

5.3.5 结果后处理与分析

1. 与上例一样，由于本例的长宽比很大，显示出的图形过于狭长，所以选择 Mesh→Scale 命令，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 5-89 所示。在该对话框右下角 Scaling Factors 的 Y 中输入 0.1，单击 Scale 按钮，使得轴向长度缩小到原来的 0.1。然后单击 Close 按钮，退出该对话框。

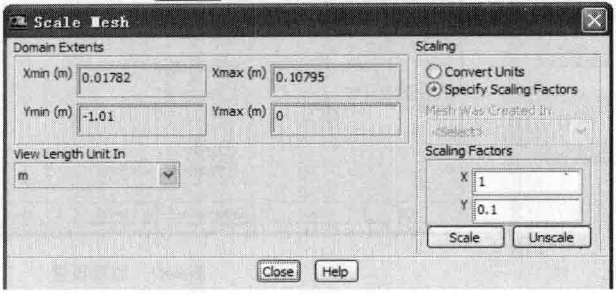


图5-89　Scale Mesh 对话框

2. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 5-90 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Phases 和 Volume fraction，并选择 Phase 下拉列表中的 zuanjingye，单击 Display 按钮，得到图 5-91 所示的泥浆体积分数云图。此时对应的是 1.7s 的结果，气体基本到达井口。

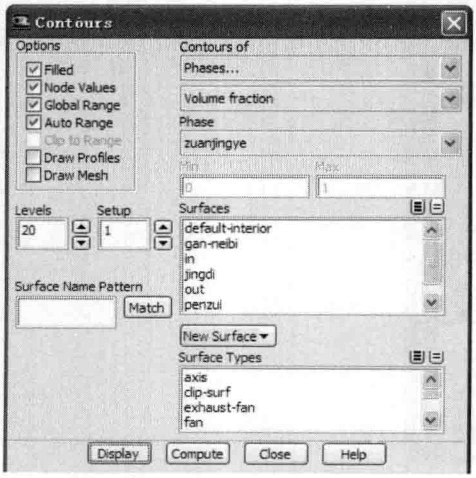


图5-90　Contours 对话框

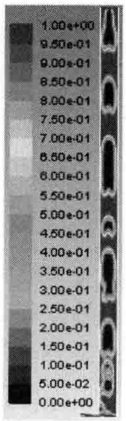


图5-91　1.7s 时的泥浆体积分数云图

3. 为了观测气侵的整个过程，可以选择 File→Read→Data 命令，分别读入 5-3-0.3s.dat、5-3-0.6s.dat、5-3-0.9s.dat、5-3-1.2s.dat 和 5-3-1.5s.dat，采用同样的方法显示这些时刻的泥浆体积分数云图。然后，将它们的云图放在一起，就可以看到气侵上窜的整个时间历程，如图 5-92 所示。

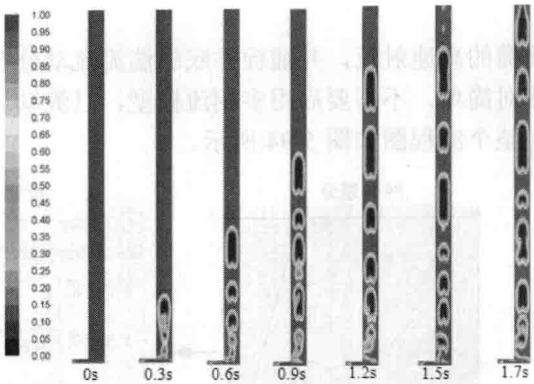


图5-92　气侵上窜过程

5.4　井底喷嘴射流分析

了解井底钻头喷嘴的射流场分布，有助于计算井底水力冲击能、评价钻进效果和钻头破岩效果。普通的三牙轮钻头有三个水力喷嘴，泥浆通过喷嘴喷出，流速迅速增大，形成了较大的水力冲击能量，有助于钻头破岩，同时也有助于井底岩屑的清洗。然而，喷嘴射流在井底有限空间内的流动十分紊乱，有明显的涡流存在，利用 FLUENT 软件模拟得到局部流场分布，有助于钻井工作者选用钻头、设计喷嘴直径和调整水力参数。

5.4.1　案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 5-93 所示，裸眼直径为 320mm，钻铤直径为 228.6mm，钻头底部直径为 311.2mm，钻头中间有一个当量喷嘴，喷嘴长 10mm，口径为 15mm，喷嘴距离井底 10mm，模拟段长度取为 3m。钻铤上部设为入口，通入清水作为模拟流体，清水经由钻铤至钻头喷嘴喷出，遇井底阻挡后从钻铤与井眼构成的环形空间上返，环形空间上部设为出口边界。

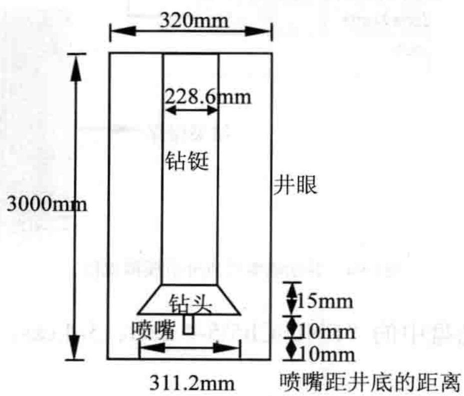


图5-93　井底喷嘴射流模型示意图

【思路分析】

本例旨在模拟井下喷嘴的高速射流，并捕捉井底的湍流流动分布，所以需要启用湍流模型。流动流体为水时，相对简单，不需要启用多相流模型，且流动达到稳定后为定常流，因此也不需要非定常模型。整个流程图如图 5-94 所示。

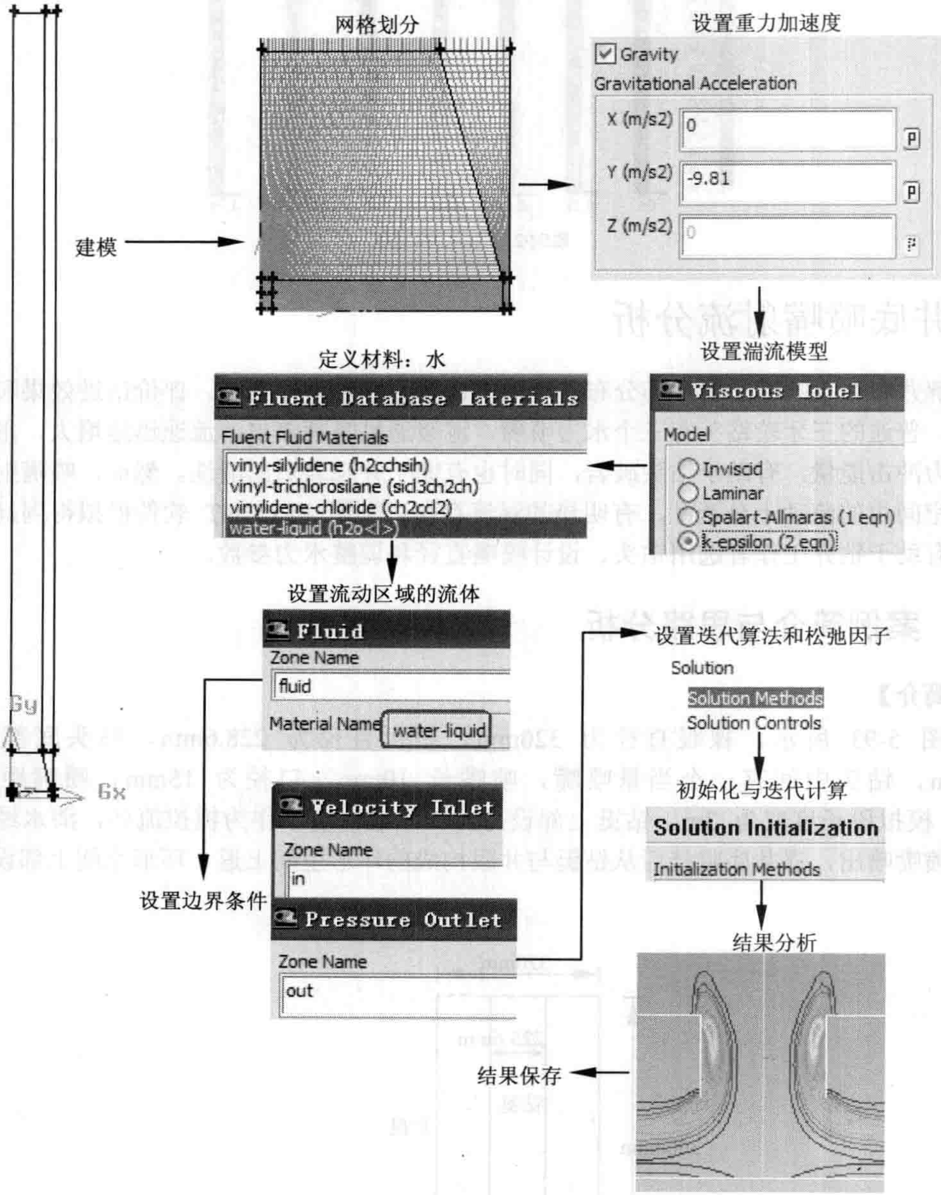


图5-94 井底喷嘴射流分析模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch5\5-4.msh、5-4.cas、5-4.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch5\5-4.avi”文件。

5.4.2 几何建模

1. 由于问题具有对称性，因此只需建立一半的模型，中间边界设置为对称边界即可。启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Height 中输入 3000，如图 5-95 所示，在 Width 中输入 160。选择 Direction 为+X +Y，单击 Apply 按钮生成一个矩形面域，用于表示一半的井眼。
2. 采用同样的方法绘制第二个矩形面，用于表示钻铤段。在 Create Real Rectangular Face 面板的 Height 中输入 2830，如图 5-96 所示，在 Width 中输入 114.3。

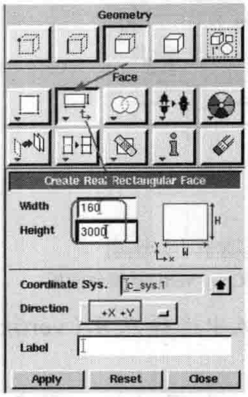


图5-95 绘制第一个大矩形面

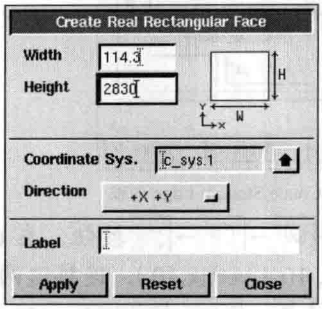


图5-96 绘制第二个矩形面

3. 将第二个矩形面向 Y 轴正向平移，单击 → → 按钮，弹出图 5-97 所示的 Move/Copy Faces 面板，单击 Faces 右侧的黄色输入框，按住 Shift 键选中刚画的第二个矩形面 face.2。然后，选择 Move，使按钮红色显示。将 Operation 选为 Translate，代表平移。在 Global 的 y 中输入 170，x 和 z 保持为 0，单击 Apply 按钮，即将第二个矩形面向 Y 轴正向平移 170m。
4. 单击 → → 按钮，在图 5-98 所示的 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（155.6，20，0），单击 Apply 按钮生成一个点。

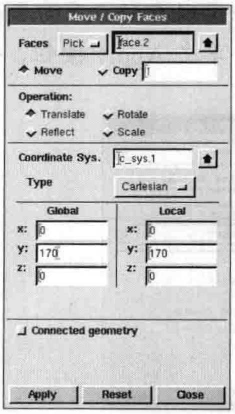


图5-97 平移第二个矩形面

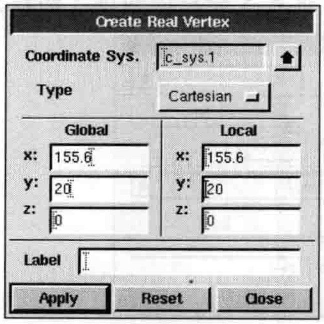


图5-98 Create Real Vertex 面板

5. 单击 → → 按钮，在图 5-99 所示的 Create Straight Edge 面板中选择点 6（vertix.6）与点 9（vertix.9），连接这两点生成直线段。
6. 单击控制面板中的 → → 按钮，弹出 Move/Copy Vertices 操作面板，如图 5-100 所示。在 Vertices Pick 中选择 vertex.9，然后单击下方的 Copy，使其红色显示（表示选中）。在 Operation 中选择 Translate，代表平移。在下方的 x、y、z 中输入（–200、0、0），表示将点 9 在向 X 轴负向平移 200 的位置复制出一个点。单击 Apply 按钮，即复制出该点，为 vertex.10。

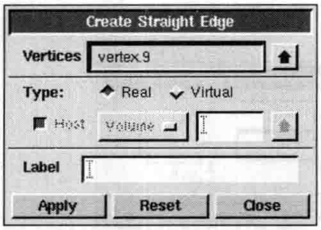


图5-99 Create Straight Edge 面板

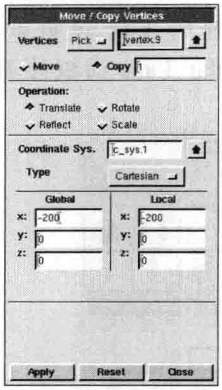


图5-100 Move/Copy Vertices 操作面板

7. 单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中选择点 9（vertix.9）与点 10（vertix.10），连接这两点生成直线段。
8. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，如图 5-101 所示，在 Edge 中选择 edge.4，Split With 右侧选择 Edge，即用现有的线来分割线段 4。在下方的 Edge 中选择 edge.10（刚才第 7 步生成的辅助线），单击 Apply 按钮，使线段 4 被线段 10 分割成两段（两段为 edge.4 和 edge.11），同时线上出现了分割点（vertix.11）。
9. 单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中选择点 9（vertix.9）与刚得到的点 11（vertix.11），连接这两点生成直线段。
10. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，在 Edge 中再次选择 edge.4，不过此时的 Split With 右侧选择为 Vertex，即用现有的点来分割线段 4。在下方的 Vertex 中选择 vertex.5，如图 5-102 所示，单击 Apply 按钮，使线段 4 被点 5 分割成两段（两段为 edge.4 和 edge.13）。

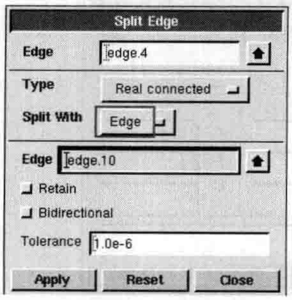


图5-101 Split Edge 面板

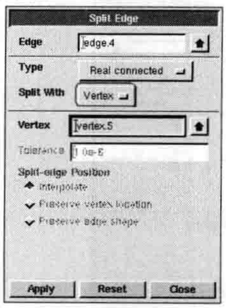


图5-102 用点分割线

11. 单击 → → 按钮，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0，10，0），单击 Apply 按钮生成一个点（vertix.12）。接着分别输入（7.5，10，0）和（7.5，20，0），生成另外两个点（vertix.13 和 vertix.14）。
12. 单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中按顺序选择点 12（vertix.12）、点 13（vertix.13）和点 14（vertix.14），单击 Apply 按钮，则可连接点 12 与点 13，以及点 13 与点 14 之间的两条线段。
13. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，在 Edge 中再次选择 edge.11，在 Split With 右侧选择为 Vertex，在下方的 Vertex 中选择 vertex.12，单击 Apply 按钮。
14. 单击 → → 按钮，弹出 Move/Copy Vertices 操作面板。在 Vertices Pick 中选择 vertex.9 和 vertex.13，然后单击下方的 Copy，使其红色显示（表示选中）。在 Operation 中选择 Translate，代表平移。在下方的 x、y、z 中输入（0、–50、0），单击 Apply 按钮，复制出点 vertex.15 和 vertex.16。
15. 单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中选择点 13 和点 15，单击 Apply 按钮，生成这两点间的线段，然后用同样的方法生成点 9 和点 16 之间的线段。
16. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，在 Edge 中选择 edge.1，在 Split With 右侧选择 Edge，在下方的 Edge 中选择 edge.17（刚才点 13 和点 15 间生成的辅助线），单击 Apply 按钮。按同样的方法，选择 edge.19 被 edge.18（刚才点 9 和点 16 间生成的辅助线）切割，单击 Apply 按钮。
17. 单击 → → 按钮，弹出 Move/Copy Vertices 操作面板。在 Vertices Pick 中选择 vertex.6 和 vertex.9，然后单击下方的 Copy，使其红色显示（表示选中）。在 Operation 中选择 Translate，代表平移。在下方的 x、y、z 中输入（50、0、0），单击 Apply 按钮，复制出点 vertex.19 和 vertex.20。
18. 单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中选择点 6 和点 19，单击 Apply 按钮，生成这两点间的线段，然后用同样的方法生成点 9 和点 20 之间的线段。
19. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，在 Edge 中选择 edge.2，在 Split With 右侧选择 Edge，在下方的 Edge 中选择 edge.21（刚才点 6 和点 19 间生成的辅助线），单击 Apply 按钮。按同样的方法，选择 edge.2 被 edge.22（刚才点 9 和点 20 间生成的辅助线）切割，单击 Apply 按钮。
20. 单击 → → 按钮，在 Create Straight Edge 面板中按次序连接点 13 与点 17 间的线段、点 9 和点 18 间的线段、点 9 和点 22 间的线段、点 6 和点 21 间的线段。
21. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，在 Edge 中选择 edge.12，在 Split With 右侧选择 Vertex，在下方的 Vertex 中选择 vertex.14，单击 Apply 按钮。按同样的方法，将 edge.3 被 vertex.7 分割。
22. 单击 → → 按钮，在图 5-103 所示的 Create Face from Wireframe 面板中完成需要创建的面。在 Edges 右侧的黄框中单击一下，然后按住 Shift

键，单击线段 5、线段 9、线段 12、线段 13 和线段 29，单击 Apply 按钮生成一个面。然后，按照同样的方法将线段 11、线段 14、线段 15 和线段 29 围成一个面，将线段 1、线段 14、线段 16 和线段 25 围成一个面，将线段 12、线段 15、线段 19、线段 25 和线段 26 围成一个面，将线段 2、线段 20、线段 26 和线段 27 围成一个面，将线段 9、线段 24、线段 27 和线段 28 围成一个面，将线段 3、线段 6、线段 23 和线段 28 围成一个面。

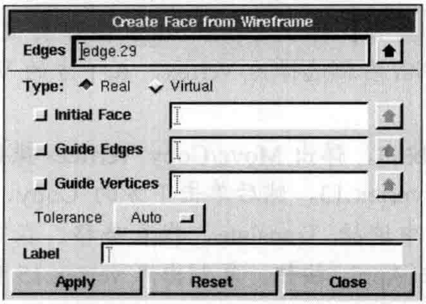


图5-103　Create Face from Wireframe 面板

23. 此时，原先创建的大面 face.1 已不再需要，因此，单击 → → 按钮，弹出图 5-104 所示的 Data Faces 面板，在 Faces 右侧选择 face.1，单击 Apply 按钮，将面 1 删除。建立好的几何模型如图 5-105 所示。

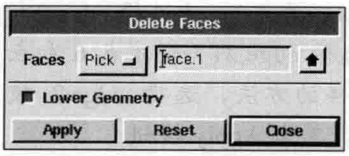
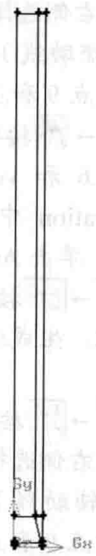


图5-104　Data Faces 面板


图5-105　建立好的几何模型

5.4.3　网格划分

1. 单击 → → 按钮，在图 5-106 所示的 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中线段 1（edge.4）、线段 14 和线段 29，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval Count 分段方式（即将线段等分为多少段的方式），并在左侧输入栏中输入 10，单击 Apply 按钮生成这三条线的线网格。

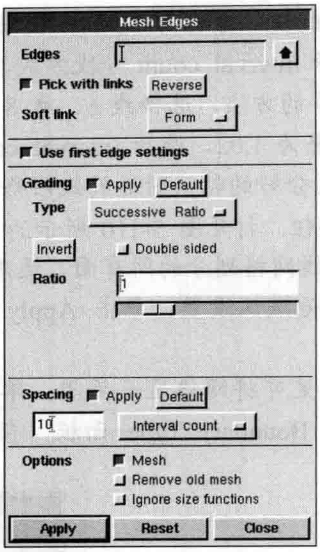
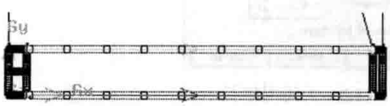


图5-106　体 2 的网格划分

2. 在 Mesh Edges 面板中，按照同样的方式将线 11、线 15、线 16 和线 25 都等分为 10 段；将线 2 和线 26 等分为 20 段（线 2 与线 15、线 25 两者对应，因此分段数为两者之和）；将线 3、线 20、线 27 和线 28 等分为 10 段；将线 5 和线 7 等分为 60 段。
3. 仍然在 Mesh Edges 面板中，选择线 12 和线 19，选择时线段上会出现红色的箭头，这里要使得两根线的箭头指向一致，可以通过单击鼠标中键来调转箭头的方向，使两根线段的箭头同时指向 X 轴正向，如图 5-107 所示。然后在 Mesh Edges 面板中，将 Ratio 调整为 1.05，选择 Interval Count 分段方式，将线 12 和线 19 分为 50 段，如图 5-108 所示。


图5-107　线网格划分时的箭头指向

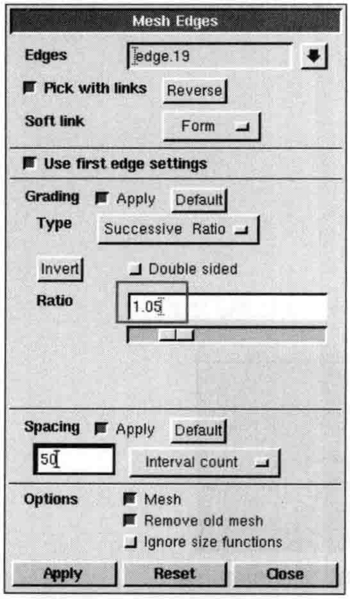
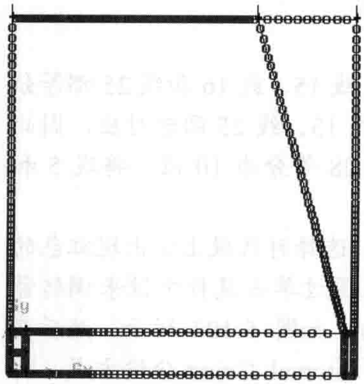


图5-108　递增线网格划分

4. 采用同样的方法，选择线 9、线 13 和线 24，使三者的箭头指向 Y 轴负向，将 Ratio 调整为 0.98，选择 Interval count 分段方式，将线 9、线 13 和线 24 也分为 50 段。然后采用同样的方法，选择线 6、线 8 和线 23，使三者的箭头指向 Y 轴正向，将 Ratio 调整为 1.02，选择 Interval count 分段方式，将线 6、线 8 和线 23 分为 100 段。划分好的钻头附近的线网格如图 5-109 所示。
5. 单击 → → 按钮，打开图 5-110 所示的 Mesh Faces 面板，用 Shift+鼠标左键选中已经完成线网格划分的所有面，运用 Quad 单元与 Map 方法进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可，其近底部的局部网格如图 5-111 所示。
6. 为了便于定义边界，这里可将网格显示关闭。单击控制面板下方的 ，弹出图 5-112 所示的 Specify Boundary Types 面板，在下方 Mesh 右侧选中 Off，单击 Apply 按钮。


图5-109　钻头附近的线网格

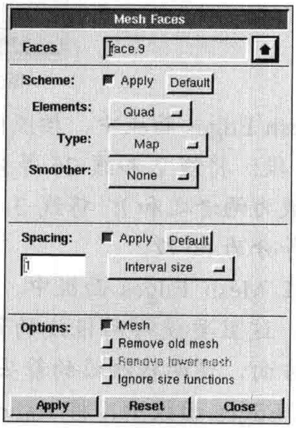
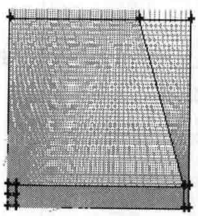


图5-110　Mesh Faces 面板


图5-111　底部的局部网格

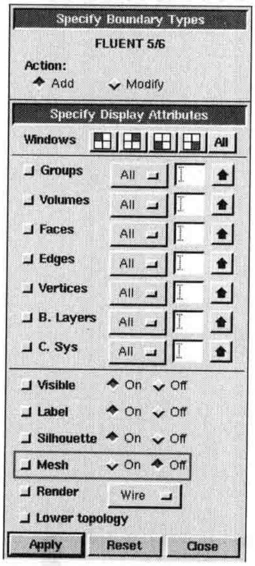


图5-112　关闭网格显示

7. 下面定义边界类型。单击 → 按钮，选中钻铤进口（edge.7），定义为速

度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 in；选中环空出口（edge.3），定义为压力出口边界（PRESSURE_OUTLET），名称为 out；选择钻铤、钻头与喷嘴壁面（edge.6、edge.9、edge.12 和 edge.15），定义为 WALL 边界，名称为 neibi；同样，将 edge.1、edge.2、edge.19、edge.20、edge.23 和 edge.24 定义为 WALL 边界，名称为 waibi；将 edge.8、edge.11、edge.13 和 edge.16 定义为 SYMMETRY 边界，名称为 duichen。定义好的边界类型如图 5-113 中的列表所示。

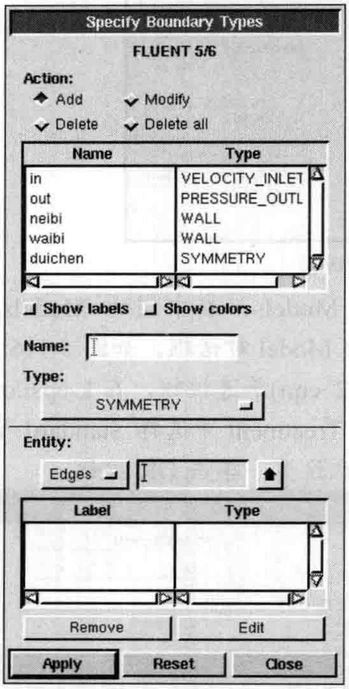


图5-113　边界类型定义

8. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 5-4.msh。

5.4.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件“5-4.msh”。网格读入之后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。
3. 单击 General 控制面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 5-114 所示。本例需要重新定义网格的尺寸，在 Scale Mesh 对话框中选择 Scaling 下方的 Specify Scaling Factors 单选按钮，然后在 Scaling Factors 下的 X、Y 中均输入 0.001，单击 Scale 按钮。这时就可以发现 Domain Extents

中的X、Y最大值和最小值发生了变化，单击 Close 按钮关闭该对话框。

4. 在左侧控制树中单击 General，选中中间控制面板中的 Gravity 复选框，如图5-115所示，在 Y (m/s2)右侧输入框中输入–9.81，即表示重力方向沿Y轴负向。

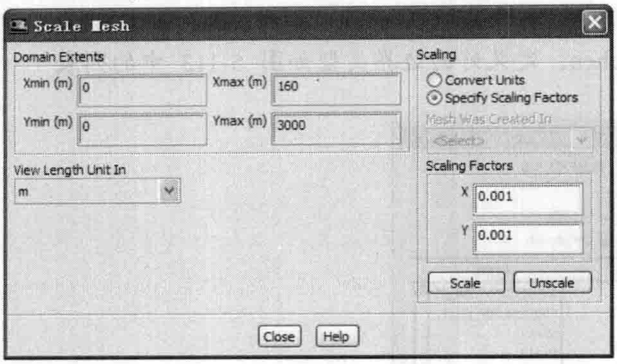


图5-114 Scale Mesh 对话框

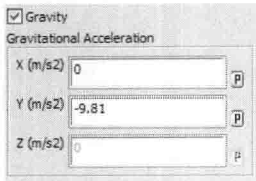


图5-115 重力设置

5. 在左侧控制树中单击 Models，在中间的 Models 控制面板中双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图5-116所示。在该对话框中，选择 Model 下的 k-epsilon (2 eqn)单选按钮，在 k-epsilon Model 下选择 Standard 单选按钮，在 Near-Wall Treatment 中选择 Standard Wall Functions（标准壁面函数），模型参数保持默认设置，单击 OK 按钮。

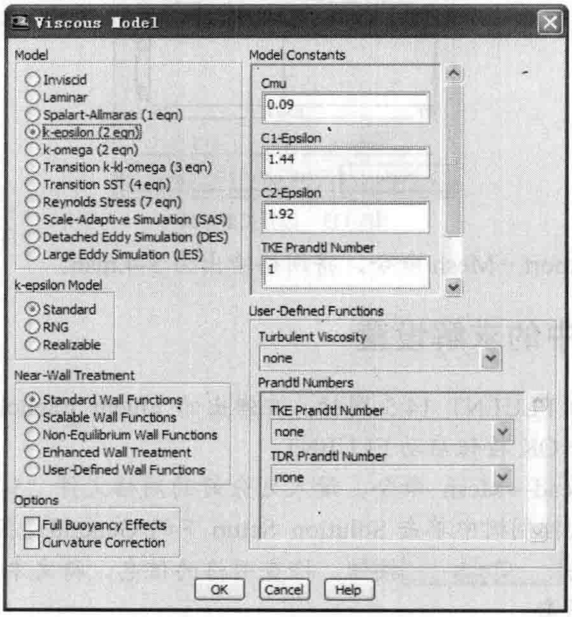


图5-116 湍流模型设置

6. 单击左侧控制树中的 Materials，在中间的 Materials 控制面板中单击 Create/Edit... 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。在该对话框中单击 Fluent Database... 按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，如图5-117所示。利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 下拉列表中的液态水（water-

FLUENT CFD 工程仿真实战指南

liquid (h2o<l>)），单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料——水复制到当前工程中。单击 Close 按钮关闭 Fluent Database Materials 对话框。

7. 单击左侧控制树中的 Cell Zone Conditions，在中间的 Cell Zone Conditions 控制面板中双击 fluid，弹出图 5-118 所示的 Fluid 对话框。在该对话框的 Material Name 下拉列表中选择 water-liquid，即表示整个计算域中流动的流体为水，单击 OK 按钮退出。

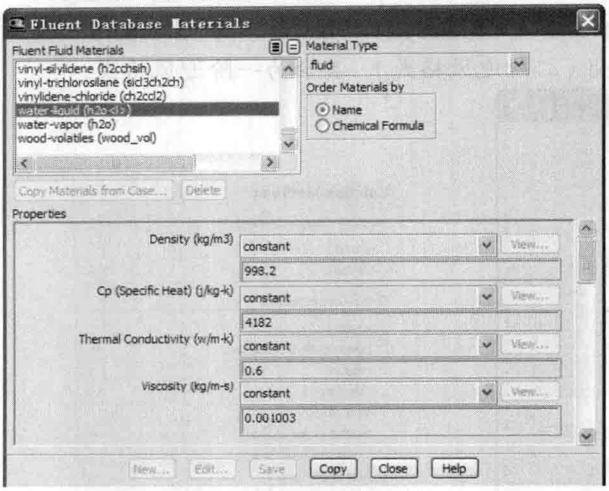


图5-117 材料水的调用

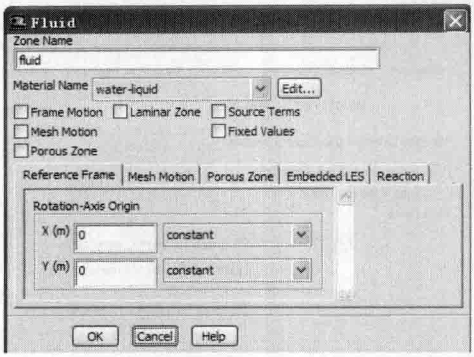


图5-118 计算域中流动的流体设置

8. 接下来定义边界条件。单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在中间的 Boundary Conditions 控制面板中可以看到在 Gambit 中定义好的边界条件名称。首先在 Zone 中选中 in，单击 Edit... 按钮，弹出图 5-119 所示的 Velocity Inlet 对话框。在 Velocity Magnitude (m/s)中输入 1，选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Viscosity Ratio，在 Turbulent Intensity (%)中输入 5，在 Turbulent Viscosity Ratio 中输入 10，单击 OK 按钮。

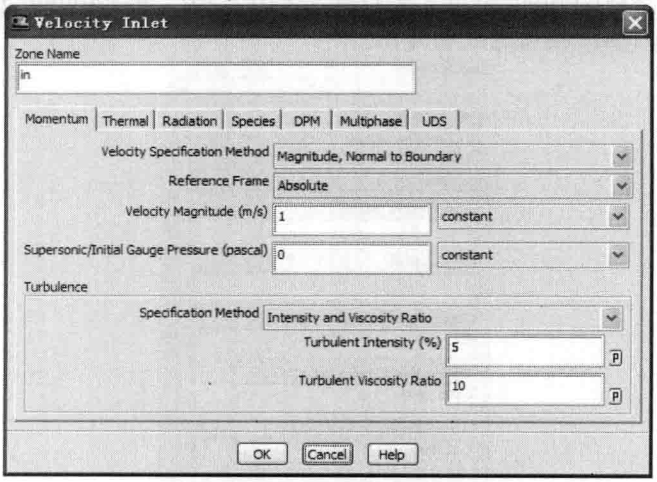


图5-119 速度入口设置

9. 回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 中的 out，单击 Edit... 按

钮，在图 5-120 所示的 Pressure Outlet 对话框中的 Gauge Pressure (pascal)中输入 0，选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Viscosity Ratio，在 Turbulent Intensity (%)中输入 5，在 Turbulent Viscosity Ratio 中输入 10，单击 OK 按钮。其余的壁面边界保持默认设置。

10. 边界定义好后，在左侧控制树中单击 Solution Methods，中间区域即出现 Solution Methods 控制面板，如图 5-121 所示。其中，压力速度耦合方式选为 SIMPLE，Gradient 为 Least Squares Cell Based，Pressure 为 Standard，Momentum 为 Second Order Upwind（二阶迎风格式），其余为一阶迎风格式。

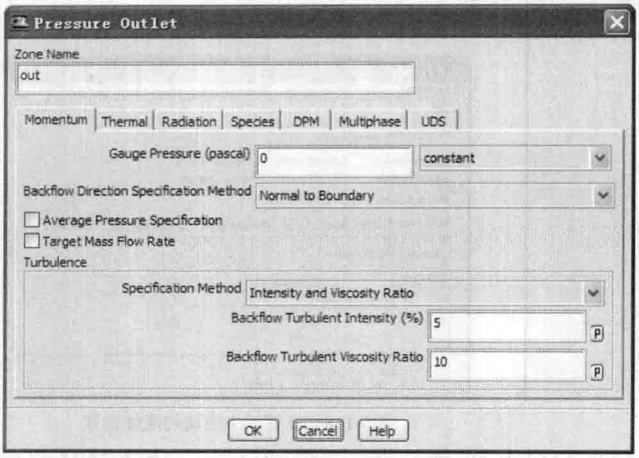


图5-120 压力出口边界设置

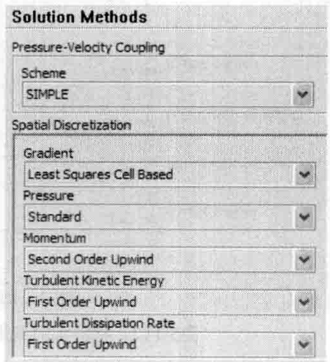


图5-121 算法设置

11. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，可以看到中间控制面板中各参数的松弛因子，这里不做改动，保持默认设置。

12. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 in，如图 5-122 所示。这时 Initial Values 中的值会有所变化，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮完成初始化。

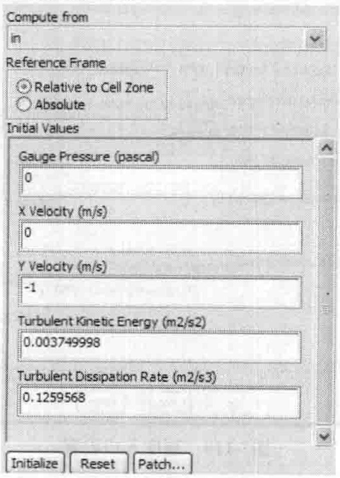


图5-122 初始化

13. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的“Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框，在 Residual Monitors 对话框选中 Plot 复选框，以打开残差曲线图。设置各参数的收敛精度要求为 0.001，单击 OK 按钮。
14. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，在中间的 Solution Controls 控制面板下方单击 Limits... 按钮，弹出图 5-123 所示的 Solution Limits 对话框，在最后一行 Maximum Turb. Viscosity Ratio 中将值改为 1e+10，即调整最大的湍动黏度比率为 1e+10，单击 OK 按钮。

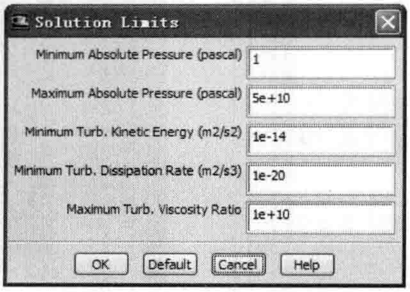


图5-123　Solution Limits 对话框

15. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 5-4.cas。
16. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 按钮开始解算。
17. 计算完成后，选择 File→Write→Data 命令，将结果文件保存为 5-4.dat。

5.4.5 结果后处理与分析

1. 本例由于采用了对称设置，分析结果时为了能够看到全局的流场分布，需要将另一半映射出来。选择 Display→Views 命令，弹出图 5-124 所示的 Views 对话框，选择右侧 Mirror Planes 下方的 duichen，单击 Apply 按钮，即将结果以 duichen 边界映射出另一半。

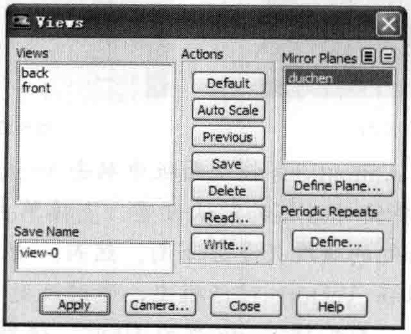


图5-124　Views 对话框

2. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and

Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 5-125 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity 和 Velocity Magnitude，单击 Display 按钮，得到图 5-126 所示的速度分布云图。

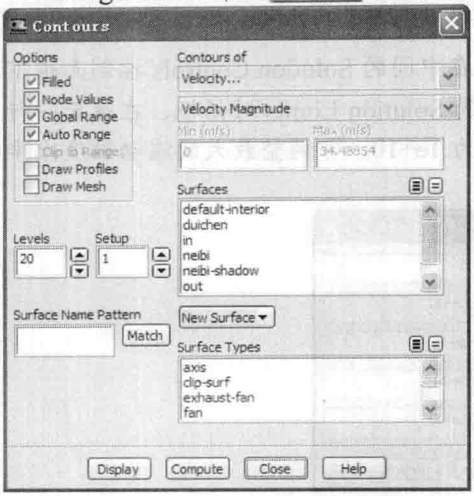


图5-125 Contours 对话框板

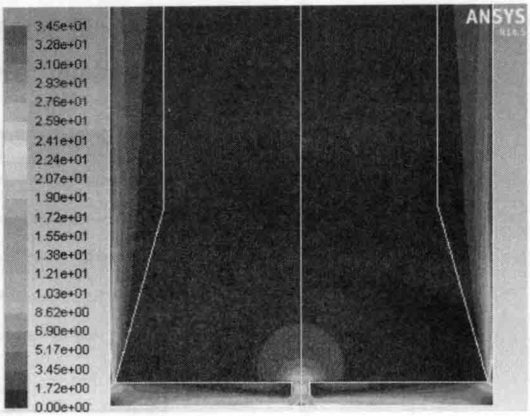


图5-126 底部速度分布云图

3. 改变 Contours 对话框中 Contours of 下拉列表的选项，选择为 Velocity 和 Vorticity Magnitude，单击 Display 按钮，可得到图 5-127 所示的涡量分布云图。
4. 在 Contours 对话框中，取消选中 Options 下方的 Filled 复选框，并利用鼠标中键放大喷嘴处的局部涡量图，可以得到图 5-128 所示的喷嘴处涡量等值线的局部细节显示。

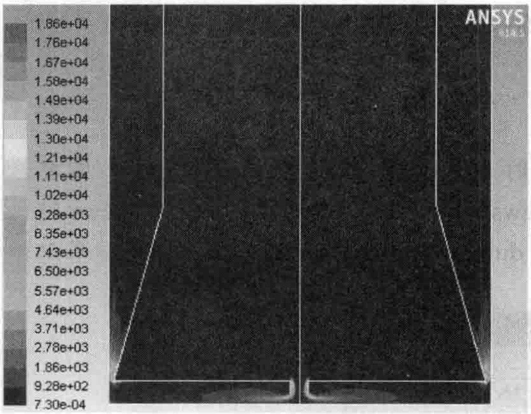


图5-127 底部涡量分布云图

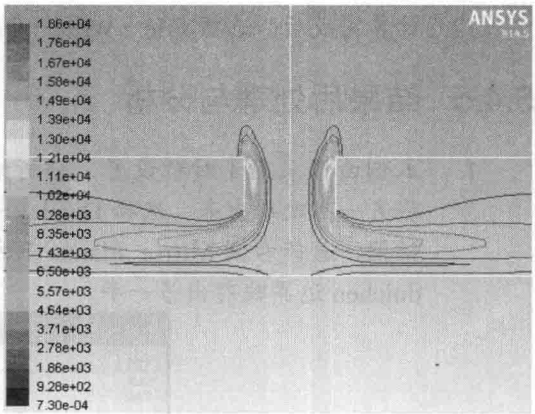


图5-128 喷嘴处的涡量等值线图

5. 在中间 Graphics and Animations 控制面板中双击 Vectors，弹出图 5-129 所示的 Vectors 对话框。保持该对话框的默认设置，直接单击 Display 按钮，可以得到图 5-130 所示的钻头处的速度矢量分布图。然而，由于矢量箭头较小，矢量图不太清楚，这时可以在 Vectors 对话框中，通过改变 Scale 的值来改变速度矢量箭头的大小，例如，我们将 Scale 改为 10 时，得到的速度矢量图如图 5-131 所示，这时我们可以清楚地分辨出喷嘴处速度的指向。

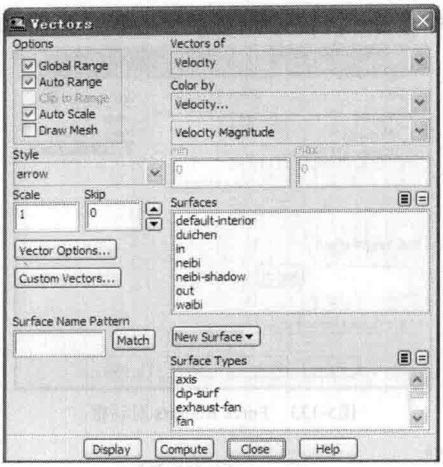


图5-129 Vectors 对话框

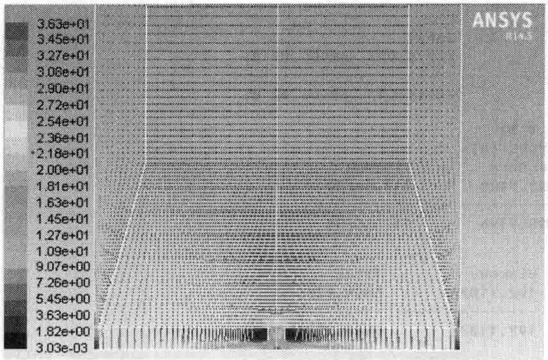


图5-130　钻头处的速度矢量分布图

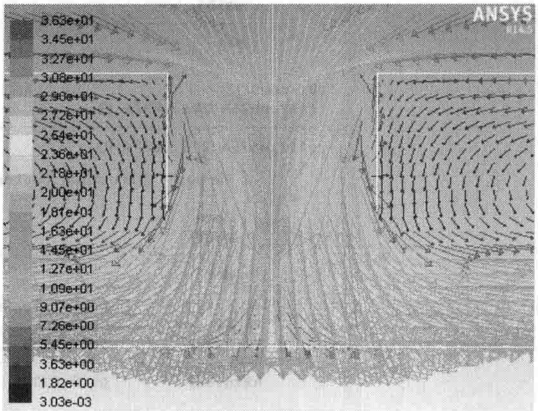


图5-131　喷嘴处的速度矢量分布图

6. 结果分析时，还可以出具相关的报告。单击左侧控制树中的 Reports，在中间的 Reports 控制面板中双击 Fluxes，弹出图 5-132 所示的 Flux Reports 对话框，在 Boundaries 中选择 in 和 out，单击 Compute 按钮，可以在 Results 中查看到进出口流量，以及在 Net Results 中看到净流量。

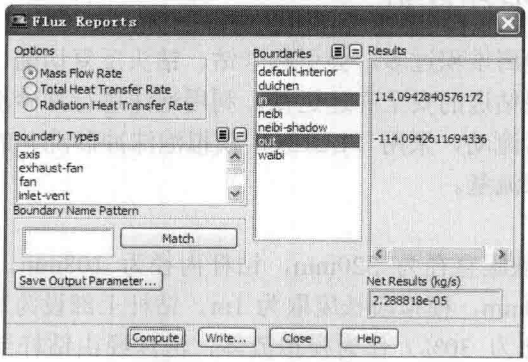


图5-132　Flux Reports 对话框

7. 同样，若在中间的 Reports 控制面板中双击 Forces，则弹出图 5-133 所示的 Force Reports 对话框，在 Wall Zones 中选择 waibi，单击 Print 按钮，则在文

本窗口中会打印出外壁受到的压力、切力大小，如图 5-134 所示。

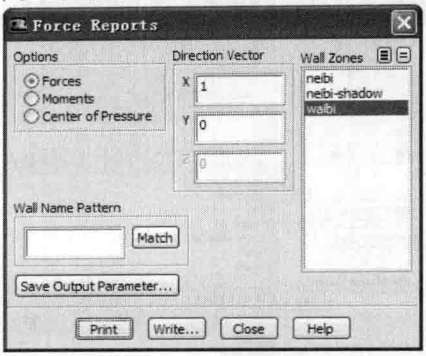


图5-133 Force Reports 对话框

```
Forces
                                  Forces (n)
Zone                              Pressure
waibi                             (4098.9194 -68891.563 0)
--------------------------        ------------------------------
Net                               (4098.9194 -68891.563 0)

Viscous                                              Total
(117.66754 296.54276 0)                              (4216.587 -68595.02 0)
------------------------------------------------     ------------------------
(117.66754 296.54276 0)                              (4216.587 -68595.02 0)

Forces - Direction Vector (1 0 0)
                                  Forces (n)
Zone                              Pressure         Viscous
waibi                             4098.9194        117.66754
--------------------------        -------------    ----------
Net                               4098.9194        117.66754

                   Coefficients
Total              Pressure          Viscous          Total
4216.587           6692.1134         192.11027        6884.2236
-----------        ---------------   -------------    ----------
4216.587           6692.1134         192.11027        6884.2236
```

图5-134 文本窗口中显示的计算结果

5.5 泡沫冲砂洗井模拟

5.5.1 案例简介与思路分析

钻井过程中，井下岩屑堆积过多，会引起卡钻、钻头反复切削，降低钻进速度。因此，及时地冲砂洗井能够确保钻进的安全高速运行。利用泡沫进行冲砂洗井，涉及气液固三相流动，冲砂上返属于非定常流动，采用 FLUENT 模拟泡沫冲砂洗井的过程可以观测岩屑的冲洗情况，有助于设计泡沫流量。

【案例简介】

如图 5-135 所示，裸眼直径为 320mm，钻杆内径为 108mm，喷嘴长 60mm，口径为 10mm，喷嘴距离井底 40mm，模拟段长度取为 1m。钻杆上部设为速度入口，通入泡沫（气液两相，液相体积百分比为 30%）作为模拟流体，泡沫经由钻杆至喷嘴喷出，井底沉积有 30mm 厚的岩屑，泡沫冲击岩屑后携带岩屑从钻杆与井眼构成的环形空间上返，环形空间上部设为出口边界。

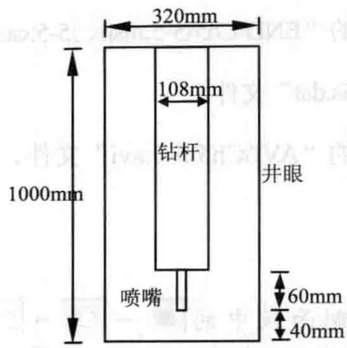


图5-135 泡沫冲砂洗井模型示意图

【思路分析】

本例为典型的气液固三相流动，这里采用欧拉模型。由于岩屑初始时刻沉积在井底有30mm 厚，因此本例为非定常问题，需要设置初始条件，采用打补丁的方式将岩屑的初始分布定义出来。整个流程图如图 5-136 所示。

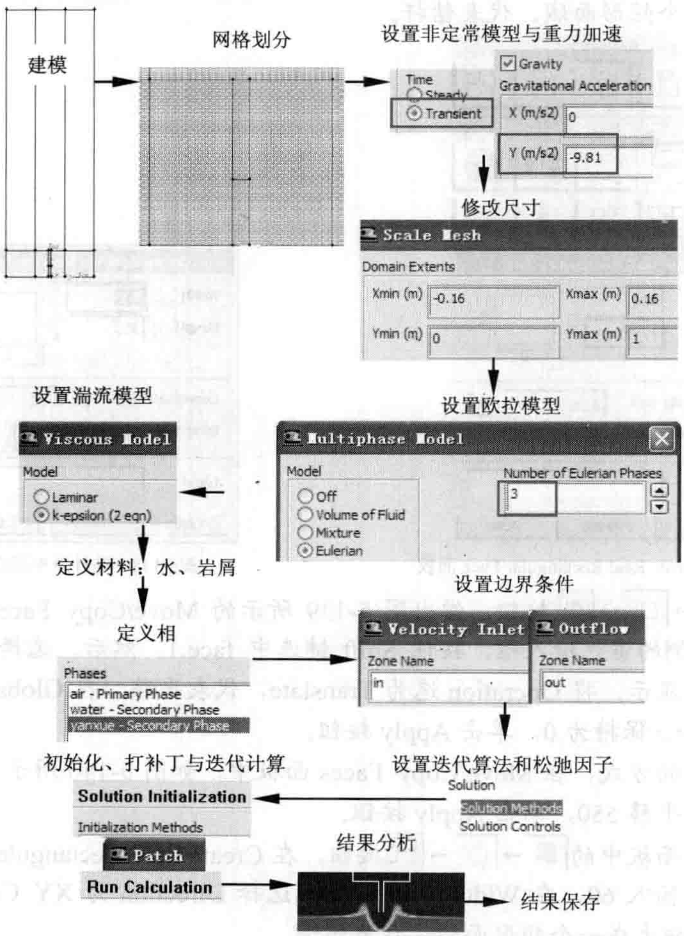


图5-136 泡沫冲砂洗井模拟流程图

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch5\5-5.msh、5-5.cas、5-5-0.01s.dat、5-5-0.02s.dat、5-5-0.03s.dat、5-5-0.04s.dat、5-5-0.05s.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch5\5-5.avi”文件。

5.5.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Height 中输入 1000，如图 5-137 所示，在 Width 中输入 320。选择 Direction 为 XY Centered，单击 Apply 按钮生成一个矩形面域，代表井眼。
2. 继续在 Create Real Rectangular Face 面板中，在 Height 中输入 900，如图 5-138 所示，在 Width 中输入 108。选择 Direction 为 XY Centered，单击 Apply 按钮生成另一个矩形面域，代表钻杆。

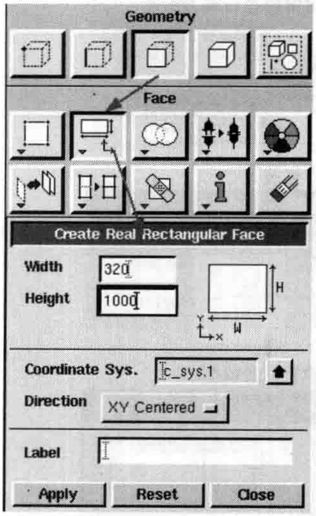


图5-137　Create Real Rectangular Face 面板

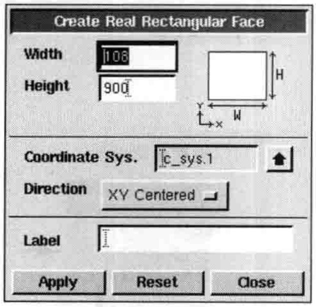


图5-138　钻杆矩形面绘制

3. 单击 → → 按钮，弹出图 5-139 所示的 Move/Copy Faces 面板，单击 Faces 右侧的黄色输入框，按住 Shift 键选中 face.1。然后，选择 Move，使按钮呈红色显示。将 Operation 选为 Translate，代表平移。在 Global 的 y 中输入 500，x 和 z 保持为 0，单击 Apply 按钮。
4. 采用同样的方式，在 Move/Copy Faces 面板中，如图 5-140 所示，将 face.2 沿 Y 轴正向平移 550，单击 Apply 按钮。
5. 单击控制面板中的 → → 按钮，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Height 中输入 60，在 Width 中输入 10，选择 Direction 为 XY Centered，单击 Apply 按钮生成一个矩形面域，代表喷嘴。
6. 单击 → → 按钮，在 Move/Copy Faces 面板中，单击 Faces 右侧的黄色输入框，按住 Shift 键选中 face.3。然后，选择 Move，使按钮呈红色显示。

将 Operation 选为 Translate，代表平移。在 Global 的 y 中输入 70，x 和 z 保持为 0，单击 Apply 按钮。

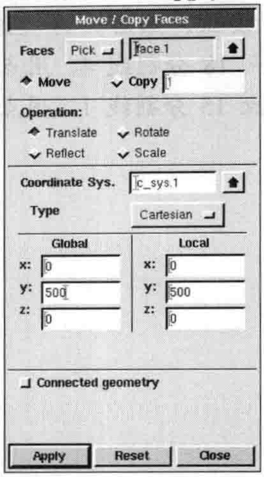


图5-139　面 1 的移动

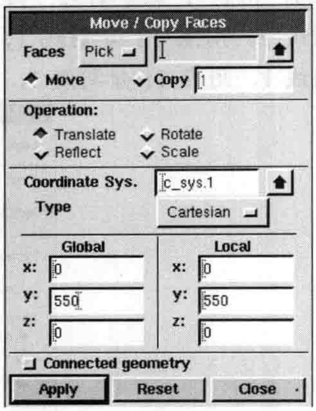


图5-140　面 2 的移动

7. 单击控制面板中的 → → 按钮，弹出 Move/Copy Vertices 操作面板，如图 5-141 所示。在 Vertices Pick 中选择 vertex.5 和 vertex.6，然后单击下方的 Copy，使其红色显示（表示选中）。在 Operation 中选择 Translate，代表平移。在下方的 x、y、z 中输入（0，–100，0），表示将点 5 和点 6 在向 Y 轴负向平移 100 的位置复制点，单击 Apply 按钮，复制出 vertex.13 和 vertex.14。
8. 按照同样的方法，在 Move/Copy Vertices 操作面板中，将 vertex.9 和 vertex.10 在 Y 轴负向平移 40 的位置复制出 vertex.15 和 vertex.16。同理，将 Vertex.6 在 X 轴正向平移 106 的地方复制出 vertex.17，将 vertex.5 在 X 轴负向平移 106 的地方复制出 vertex.18。
9. 单击 → → 按钮，在图 5-142 所示的 Create Straight Edge 面板中选择点 5（vertix.5）与点 18（vertix.18），连接这两点生成直线段。按照同样的方法，连接点 5 与点 14、点 9 与点 15、点 10 与点 16、点 6 与点 13、点 6 与点 17 间的线段。

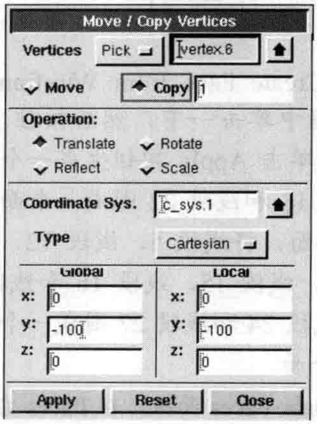


图5-141　复制点

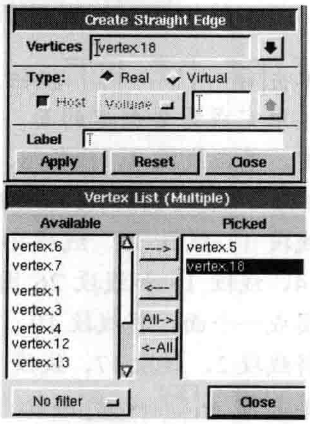


图5-142　点生成线

10. 单击 → → 按钮，弹出 Split Edge 操作面板，如图 5-143 所示，在 Edge 中选择 edge.3，在 Split With 右侧选择 Vertex，即用现有的点来分割线段 3。在下方的 Vertex 中选择 vertex.8，单击 Apply 按钮。然后，再次选择 edge.3，用点 7 来分割它。按照同样的方法，依次用点 18 分割线 4，用点 17 分割线 2，用点 13 分割线 1，用点 16 分割线 1，用点 15 分割线 1，用点 14 分割线 1，用点 11 分割线 5，用点 12 分割线 5。

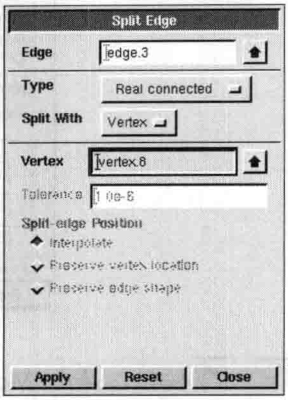


图5-143　切割线

11. 单击 → → 按钮，在图 5-144 所示的 Connect Edges 面板中，选择 edge.28 和 edge.11，单击 Apply 按钮，将重合的线 11 和线 28 合并为一条线。利用同样的方法，将线 7 和线 20 合并。

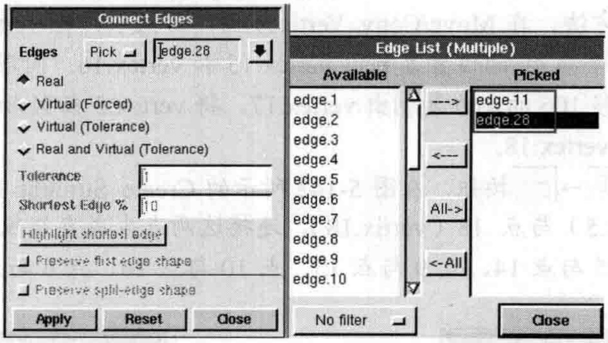


图5-144　Connect Edges 面板

12. 单击 → → 按钮，在图 5-145 所示的 Create Face from Wireframe 面板中完成需要创建的面。在 Edges 右侧的黄框中单击一下，然后按住 Shift 键，单击线段 4、线段 8、线段 13 和线段 19，单击 Apply 按钮生成一个面。然后，按照同样的方法将线段 3、线段 6、线段 18 和线段 22 围成一个面，将线段 1、线段 13、线段 14 和线段 21 围成一个面，将线段 5、线段 12、线段 14、线段 15 和线段 26 围成一个面，将线段 9、线段 15、线段 16 和线段 25 围成一个面，将线段 10、线段 16、线段 17、线段 24 和线段 27 围成一个面，将线段 2、线段 17、线段 18 和线段 23 围成一个面。

13. 单击 → → 按钮，弹出图 5-146 所示的 Data Faces 面板，在 Faces 右侧选择 face.1，单击 Apply 按钮，将面 1 删除。建立好的几何模型如图 5-147 所示。

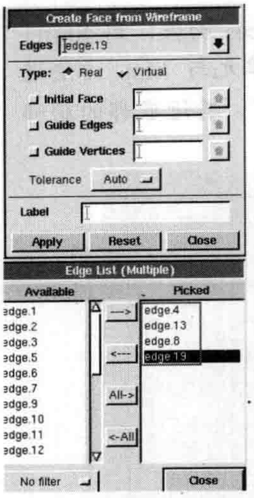


图5-145　生成面

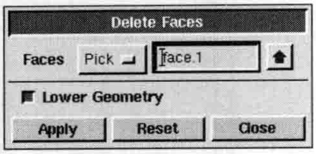


图5-146　删除面 1

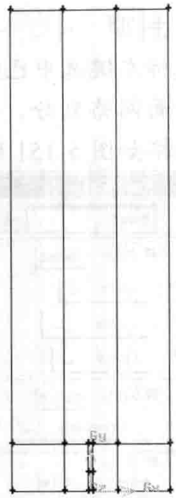


图5-147　建好的几何模型

5.5.3 网格划分

1. 单击[图标]→[图标]→[图标]按钮，在图 5-148 所示的 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中线段 10（edge.10）和线段 12，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式（即将线段等分为多少段的方式），并在左侧输入栏中输入 60，单击 Apply 按钮生成这两条线的线网格。采用同样的方式，将线段 15 和线段 16 等分为 40 段，将线段 9、线段 11 和线段 25 等分为 10 段，将线段 2、线段 14、线段 17 和线段 21 等分为 100 段，将线段 5、线段 24、线段 16 和线段 27 等分为 49 段，将线段 1、线段 13、线段 18 和线段 23 等分为 100 段。
2. 仍然在 Mesh Edges 面板中，在 Edges 黄色输入栏中选中线段 4、线段 6、线段 8 和线段 22，使线上箭头方向指向 Y 轴正向，设置 Ratio 的节点距离比例为 1.01，选择 Interval count 分段方式，将它们分为 200 段，如图 5-149 所示。

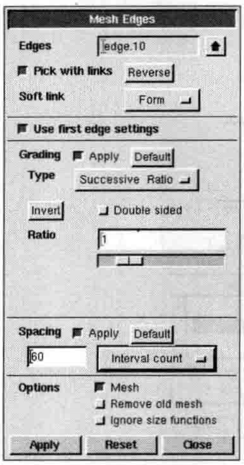


图5-148　线网格划分

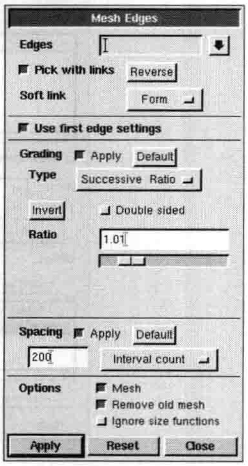


图5-149　渐进线网格划分

3. 单击[icon]→[icon]→[icon]按钮，打开图 5-150 所示的 Mesh Faces 面板，用 Shift+鼠标左键选中已经完成线网格划分的所有面，运用 Quad 单元与 Map 方法进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可，其近底部的局部网格如图 5-151 所示。

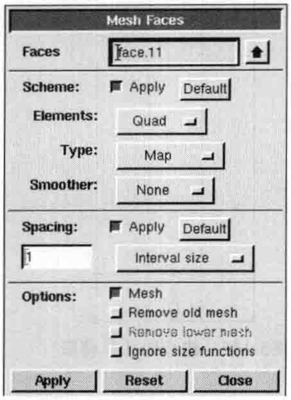


图5-150 面网格划分

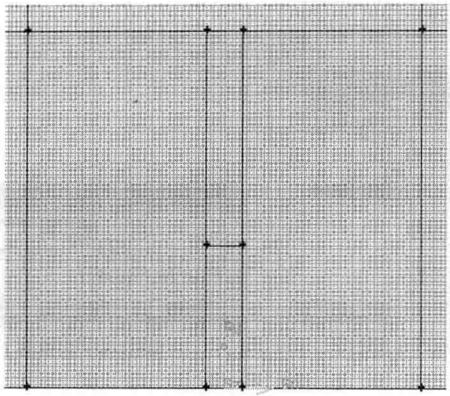


图5-151 划分好的底部面网格

4. 为了便于定义边界，这里可将网格显示关闭。单击控制面板下方的[icon]按钮，弹出 Specify Boundary Types 面板，在下方 Mesh 中选中 Off，单击 Apply 按钮。

5. 下面定义边界类型。单击[icon]→[icon]按钮，弹出 Specify Boundary Types 面板，如图 5-152 所示。选中 edge.7，定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 in；选中环空出口 edge.3 和 edge.19，定义为自由出流边界（OUTFLOW），名称为 out；选择 edge.5、edge.6、edge.8、edge.10、edge.12 和 edge.17，定义为 WALL 边界，名称为 neibi；同样将 edge.1、edge.2、edge.4、edge.21、edge.22、edge.23、edge.24、edge.25 和 edge.26 定义为 WALL 边界，名称为 waibi。

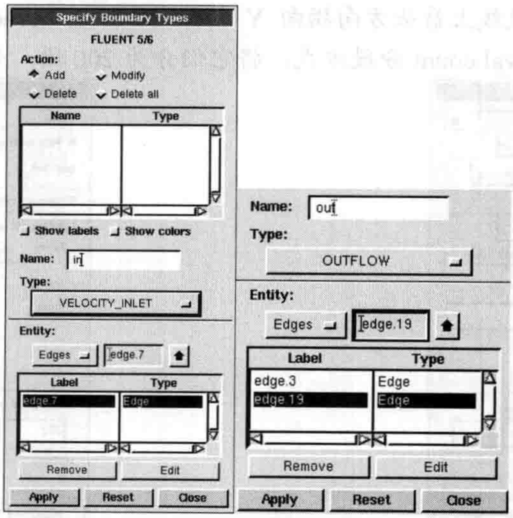


图5-152 进出口边界定义

6. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 5-5.msh。

5.5.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件“5-5.msh”。网格读入之后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。
3. 在左侧控制树中单击 General，选择中间控制面板中 Time 下的 Transient 单选按钮，表示启用瞬态计算（非定常计算或非稳定计算），如图 5-153 所示。然后选中 Gravity 复选框，即表示考虑重力影响。在 Y (m/s2)右侧输入框中输入 –9.81，即表示重力方向沿 Y 轴负向，重力加速度为 9.81m/s^2。
4. 单击 General 控制面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 5-154 所示。本例需要重新定义网格的尺寸，在 Scale Mesh 对话框中选择 Mesh Was Created In 下拉列表中的 mm，单击 Scale 按钮。这时就可以发现 Domain Extents 中的 X、Y 最大值和最小值发生了变化，单击 Close 按钮关闭该对话框。

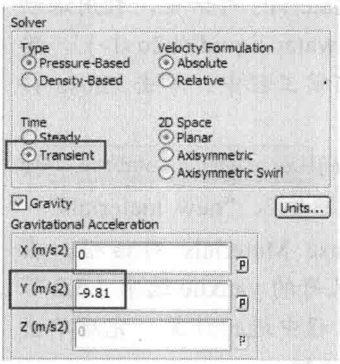


图5-153 非定常模型启用与重力加速度设置

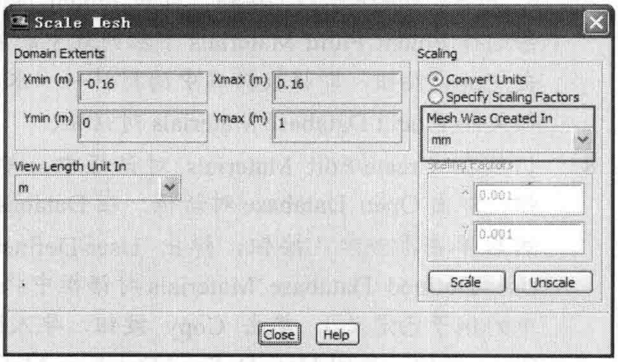


图5-154 改变尺寸

5. 单击左侧控制树中的 Models，在中间的 Models 控制面板中双击 Multiphase-Off，弹出 Multiphase Model 对话框，如图 5-155 所示。在 Multiphase Model 对话框中，选择 Model 下的 Eulerian 单选按钮，并设置右侧的 Number of Eulerian Phases 为 3，选择 Scheme 为 Implicit，单击 OK 按钮，关闭该对话框。
6. 在中间的 Models 控制面板中双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 5-156 所示。在该对话框中，选择 Model 下的 k-epsilon (2 eqn)单选按钮，在 k-epsilon Model 下选择 Standard 单选按钮，在 Near-Wall Treatment 中选择 Standard Wall Functions（标准壁面函数）单选按钮，在 Turbulence Multiphase Model 中选择 Mixture 单选按钮，模型参数保持默认设置，单击

OK 按钮。

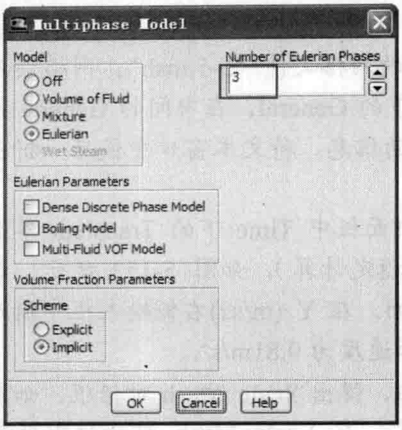


图5-155　欧拉模型设置

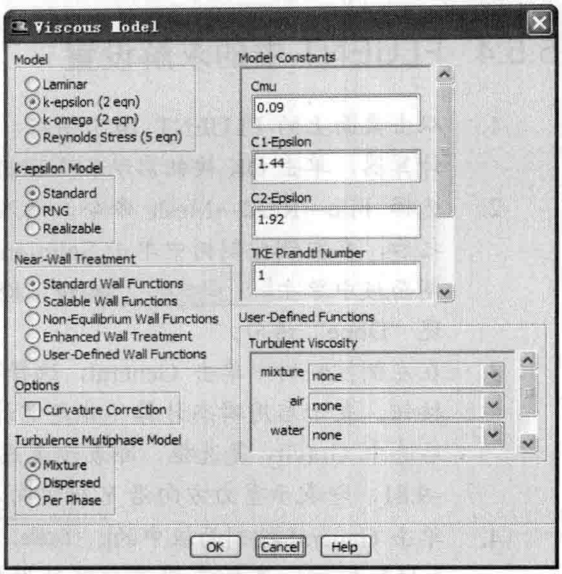


图5-156　湍流模型设置

7. 单击左侧控制树中的 Materials，在中间的 Materials 控制面板中单击 Create/Edit... 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。在该对话框中单击 Fluent Database... 按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 下拉列表中的液态水（water-liquid (h2o<l>)），单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料——水复制到当前工程中。单击 Close 按钮关闭 Fluent Database Materials 对话框。

8. 仍然在 Create/Edit Materials 对话框中，单击右侧的 User-Defined Database... 按钮，弹出 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入“new materials”，然后单击 Browse... 按钮，弹出 User-Defined Database Materials 对话框。在 User-Defined Database Materials 对话框中将原先定义好的 yanxue 选中（5.2 节中的例子已定义），单击 Copy 按钮，导入到当前工程中进行计算。完后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。

9. 下步定义基本相、第二相和第三相。单击左侧控制树中的 Phases，在中间的 Phases 控制面板中，可以看到 Primary-phase 和两个 Secondary-phase 项。首先双击 Primary-phase，弹出 Primary Phase 对话框。在其 Phase Material 下拉列表中选择 air，并修改 Name 为 air，单击 OK 按钮。然后回到 Phases 控制面板中，双击第一个 Secondary-phase，弹出 Secondary Phase 对话框。在 Phase Material 下拉列表中选择 water，并在 Name 文本框中输入 water，单击 OK 按钮。再回到 Phases 控制面板中，双击第二个 Secondary-phase，弹出 Secondary Phase 对话框，如图 5-157 所示。在 Phase Material 下拉列表中选择 yanxue，并在 Name 文本框中输入 yanxue，单击 OK 按钮。定义好的三相如图 5-158 所示。

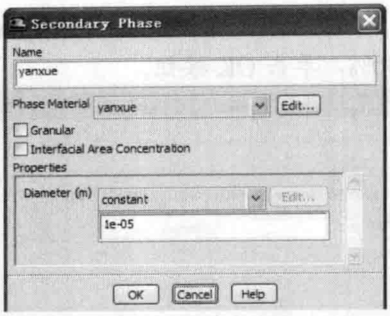


图5-157　第二相设置

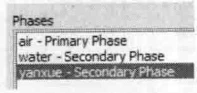


图5-158　三相选择

10. 单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在中间的 Boundary Conditions 控制面板中可以看到在 Gambit 中定义好的边界条件名称。首先在 Zone 中选中 in，单击 Edit... 按钮，弹出图 5-159 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Viscosity Ratio，在 Turbulent Intensity (%)中输入 5，在 Turbulent Viscosity Ratio 中输入 10，单击 OK 按钮。

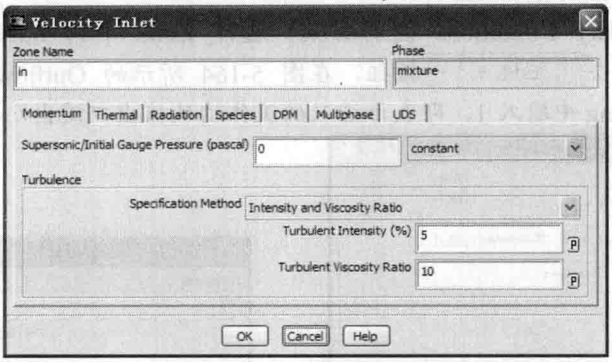


图5-159　速度入口全局设置

11. 回到 Boundary Conditions 控制面板，仍选择 Zone 下的 in，改变 Phase 为 air，单击 Edit... 按钮，在图 5-160 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Velocity Specification Method 下拉列表中的"Magnitude, Normal to Boundary"，并保持 Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity Magnitude (m/s) 中输入 2，单击 OK 按钮。

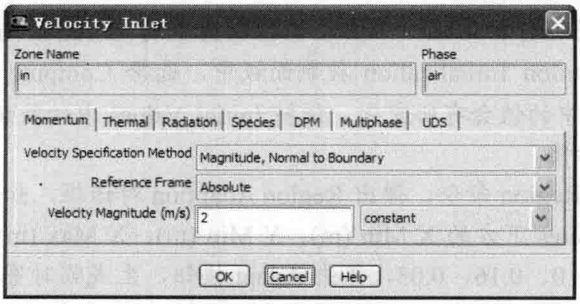


图5-160　入口气相设置

12. 再回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 下的 in，改变 Phase 为 water，单击 Edit... 按钮，如图 5-161 所示，在 Velocity Magnitude (m/s)

中输入 1，然后选择 Multiphase 选项卡，如图 5-162 所示，在 Volume Fraction 中输入 0.3，即表示在入口处水的体积分数为 30%，单击 OK 按钮。

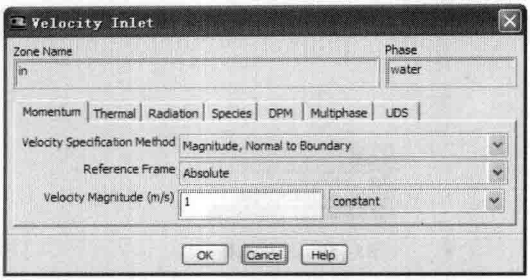


图5-161　入口处水的速度设置

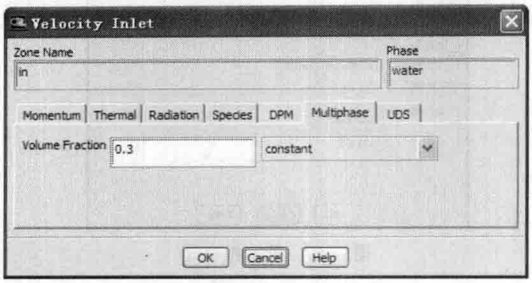


图5-162　入口处水的体积分数设置

13. 再次回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 下的 in，改变 Phase 为 yanxue，单击 Edit... 按钮，保持 Velocity Magnitude (m/s)中为 0，然后选择 Multiphase 选项卡，如图 5-163 所示，在 Volume Fraction 中输入 0，即表示在入口没有岩屑进入。
14. 回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 中的 out，保持 Phase 为 mixture，单击 Edit... 按钮，在图 5-164 所示的 Outflow 对话框的 Flow Rate Weighting 中输入 1，即表示进入的流体均从该出口流出，单击 OK 按钮。

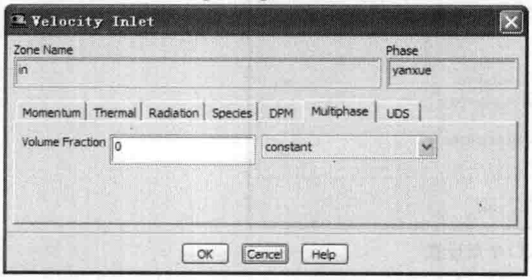


图5-163　入口岩屑的设置

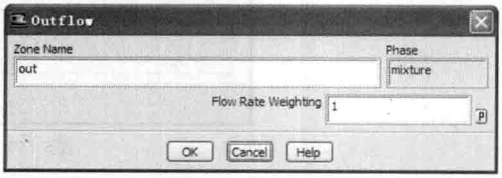


图5-164　出口设置

15. 边界定义好后，在左侧控制树中单击 Solution Methods，中间区域即出现 Solution Methods 控制面板，如图 5-165 所示，保持默认设置，不做改动。
16. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，可以看到中间控制面板中各参数的松弛因子，保持默认设置。
17. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 in，这时 Initial Values 中的值会有所变化，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮完成初始化。
18. 选择 Adapt→Region 命令，弹出 Region Adaption 对话框，如图 5-166 所示，在 Input Coordinates 下方的 X Min (m)、Y Min (m)、X Max (m)、Y Max (m)中分别输入–0.16、0、0.16、0.03，单击 Adapt 按钮，生成临时寄存区域。
19. 在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，单击下方的 Patch... 按钮，弹出图 5-167 所示的 Patch 对话框，在 Registers to Patch 中选择已经生成的临时寄存区域 hexahedron-r0，选择 Phase 下拉列表中的 yanxue，并选择 Variable 为

Volume Fraction，在 Value 输入框中输入 1，.单击 Patch 按钮。然后，改变 Phase 下拉列表中的选项为 water，在 Value 输入框中输入 0，单击 Patch 按钮，如图 5-168 所示。

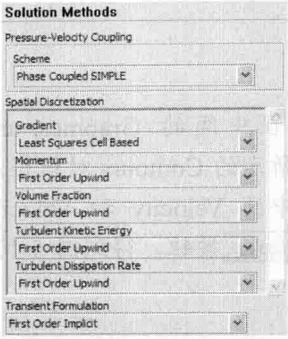


图5-165　算法设置

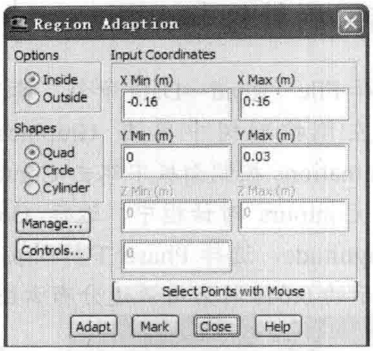


图5-166　临时寄存区域设置

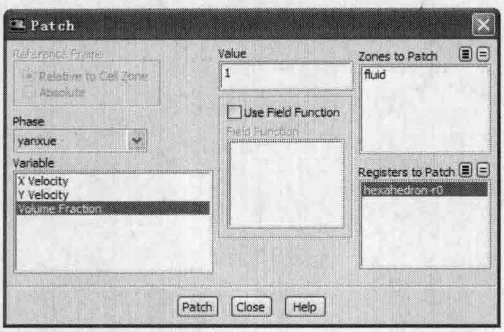


图5-167　临时区域的岩屑分布设置

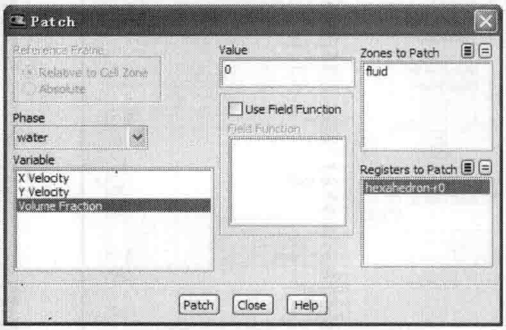
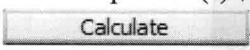


图5-168　临时区域的水相分布设置

20. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的“Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot 复选框，以打开残差曲线图。保持默认的参数收敛精度，单击 OK 按钮。
21. 在计算前，单击左侧控制树中的 Calculation Activities，如图 5-169 所示，在中间的 Calculation Activities 控制面板的 Autosave Every （Time Steps）中输入 20，代表每计算 20 个时间步自动保存一个数据文件。
22. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 5-5.cas。
23. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Time Stepping Method 为 Fixed（即时间步长恒定），如图 5-170 所示。在 Time Step Size (s)中输入 0.0005，在 Number of Time Steps 中输入 100，单击 

按钮开始解算。

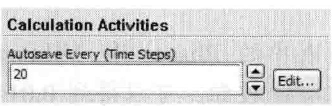


图5-169　自动保存设置

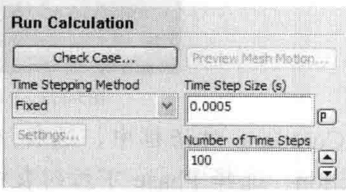


图5-170　计算设置

24. 将自动保存的数据文件按对应的时间命名，分别为 5-5-0.01s.dat、5-5-0.02s.dat、5-5-0.03s.dat、5-5-0.04s.dat、5-5-0.05s.dat。

5.5.5 结果后处理与分析

1. 选择 File→Read→Data 命令，读入 5-5-0.01s.dat。
2. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 5-171 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity 和 Velocity Magnitude，选择 Phase 下拉列表中的 yanxue，单击 Display 按钮，得到图 5-172 所示的 0.01s 时岩屑流速分布云图。

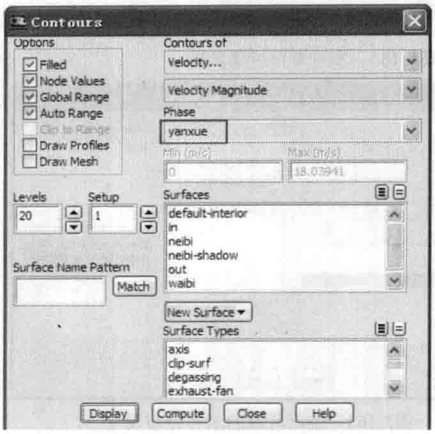


图5-171　Contours 对话框

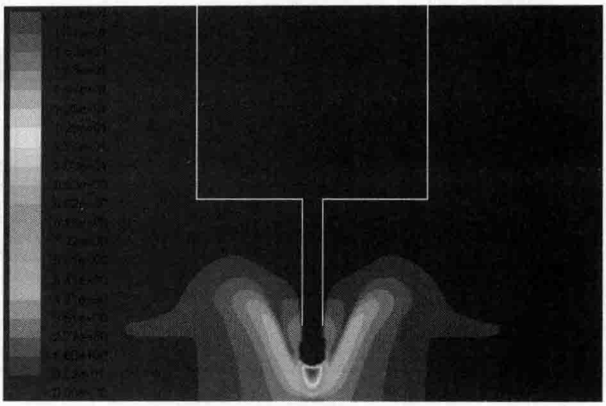


图5-172　0.01s 时岩屑的流速分布云图

3. 在 Contours 对话框中，改变 Phase 下拉列表中的选项为 air，单击 Display 按钮，得到图 5-173 所示的 0.01s 时气相流速分布云图。同理，改变 Phase 下拉列表中的选项为 water，单击 Display 按钮，得到图 5-174 所示的 0.01s 时水相流速分布云图。

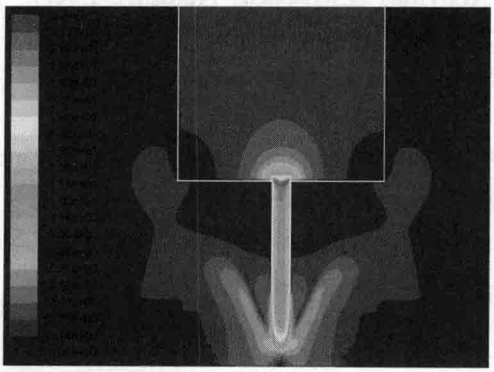


图5-173　0.01s 时的气相流速分布云图

4. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Phases 和 Volume Fraction，选择 Phase 下拉列表中的 yanxue，单击 Display 按钮，可以得到 0.01s 时的岩屑体积分数云图，如图 5-175 所示。

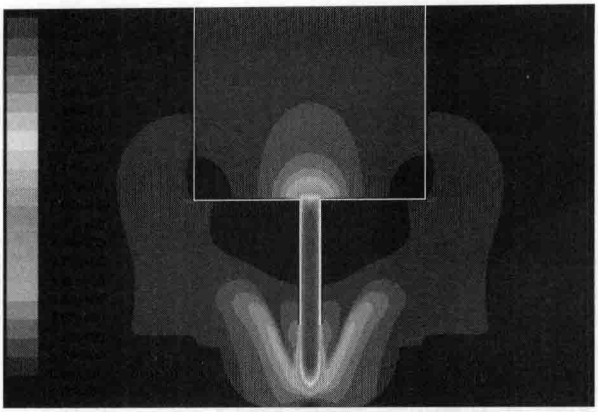


图5-174 0.01s 时的水相流速分布云图

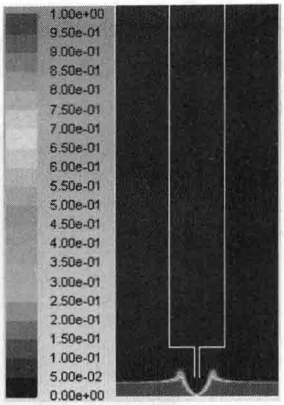


图5-175 0.01s 时的岩屑体积分数云图

5. 选择 File→Read→Data 命令，读入 5-5-0.02s.dat。

6. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Phases 和 Volume Fraction，选择 Phase 下拉列表中的 yanxue，单击 Display 按钮，可以得到 0.02s 时的岩屑体积分数云图，如图 5-176 所示。

7. 采用同样的方法，分别读入 5-5-0.03s.dat、5-5-0.04s.dat 和 5-5-0.05s.dat，可以显示这三个时刻岩屑的体积分数云图，如图 5-177～图 5-179 所示。

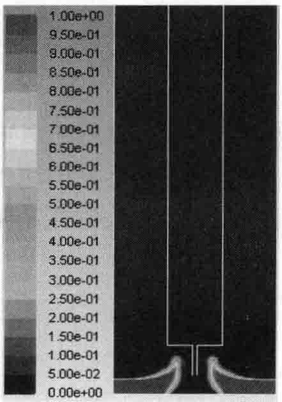


图5-176 0.02s 时的岩屑体积分数云图

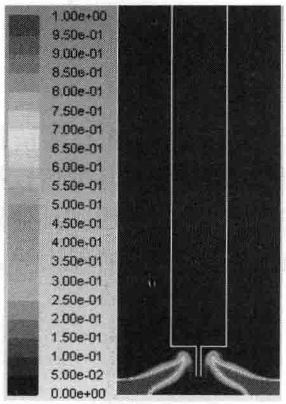


图5-177 0.03s 时的岩屑体积分数云图

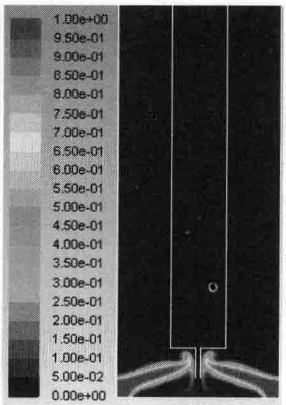


图5-178 0.04s 时的岩屑体积分数云图

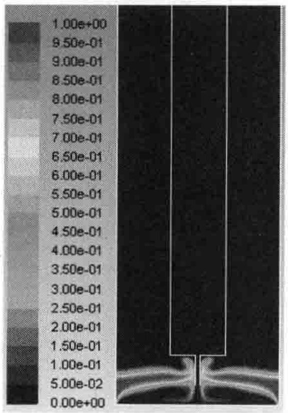


图5-179 0.05s 时的岩屑体积分数云图

8. 在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Vectors，弹出 Vectors 对话框。将 Scale 改为 10，选择 Phase 下拉列表中的 yanxue，单击 Display 按钮，可以得到图 5-180 所示的 0.05s 时的岩屑速度矢量图。

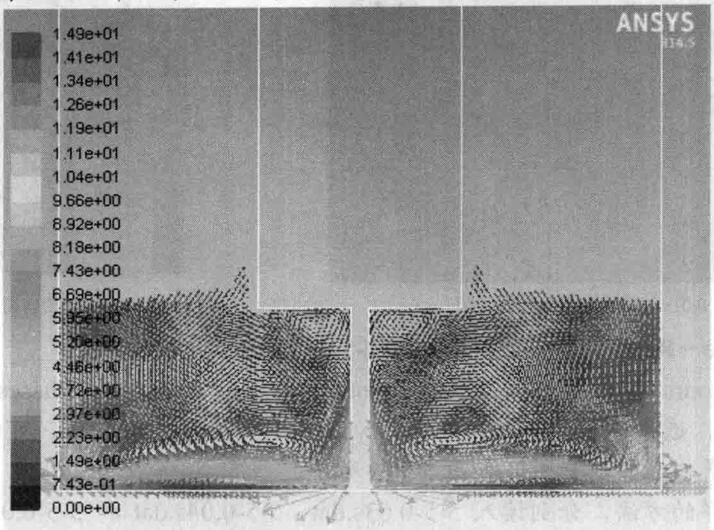


图5-180 0.05s 时的岩屑速度矢量图

5.6 小结

本章介绍了 FLUENT 在石油钻井工程中的应用，通过对钻井工程中遇到的典型流体问题进行分析，帮助用户掌握其数值模拟分析方法与操作流程。经过这几个实例的演练，读者可以采用类似的手段拓展应用到其他钻井工程问题的模拟分析中去，如泥浆钻井在偏心环空中的流动、雾化钻井环空携岩能力等。

第6章 采油气工程中的应用

采油/气工程是油气田开采过程中，根据开发目标通过生产井和注入井对油藏采取的各项工程技术措施的总称。采油/气工程的任务是通过一系列可作用于油藏的工程技术措施，使油、气畅流入井，并高效率地将其举升到地面进行分离和计量。其中涉及很多流动问题：油管中的多相流动、节流器的控流作用、不同管形对流体流动的影响等。所以，了解油气从地下油藏到地面分离过程中的流动规律，可以有效地提高油井产量和原油采收率。本章将对 FLUENT 在采油/气工程中的应用进行介绍，通过六个典型实例详细介绍采油/气工程中所涉及流体问题的数值处理方法及过程。

本章内容

- 采油/气工程中涉及的 CFD 问题。
- 节流器流场及温度场模拟。
- 文丘里管内单相流场模拟。
- T 形管内气流流场模拟。
- 垂直上升管内油水两相流动模拟。
- 采油树流场模拟。
- 油管接头流场模拟。

本章案例

- 实例 1：井下节流流场与温度场模拟。
- 实例 2：文丘里管内原油流动分析。
- 实例 3：T 形油管内天然气流动分析。
- 实例 4：上升管内油水两相流动模拟。
- 实例 5：井口采油树油流流场模拟。
- 实例 6：油管接头 J 形区涡流场模拟。

6.1 概述

采油/气是指油气开采过程中把油气从井底开采到地面的工艺过程。采油的方法可分为自喷采油和人工举升采油。自喷井生成过程中，原油流至地面分离器一般要经过图 6-1 所示的四个流动过程：从油层到井底的地下渗流；从井底到井口的垂直管流；经油嘴流出井口的

嘴流；通过井口地面出油管线流至集油站分离器的水平管流。

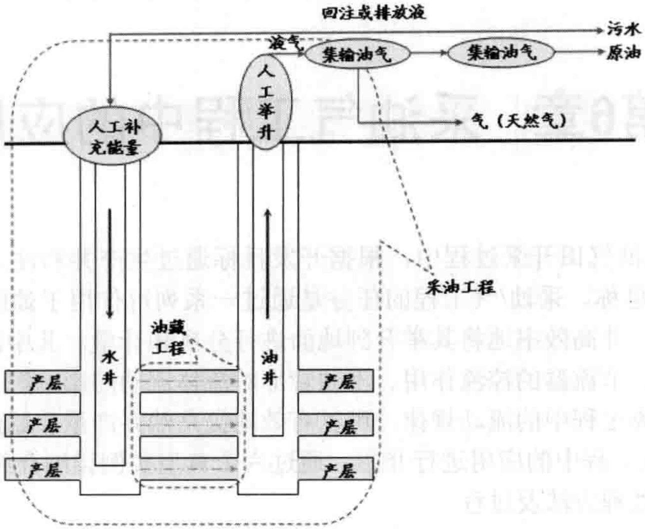


图6-1　采油工艺流程图

气举采油是依靠从地面注入井内的高压气体与油层产出的流体在井筒中混合，利用气体的膨胀使井筒中的混合液密度降低，将流到井内的原油举升到地面，这就涉及了气、液两相流的问题。

在采气过程中，如何解决气井生产中井筒积液的问题，是气井生产中经常面临的突出的问题。在解决井筒中积液的问题时，也会涉及气、液两相的流动问题。

油气产出时，油管内可能出现多种流型，如图 6-2 所示，自下而上依次为：纯油（液）流（Ⅰ）、泡流（Ⅱ）、段塞流（Ⅲ）、环流（Ⅳ）和雾流（Ⅴ）。

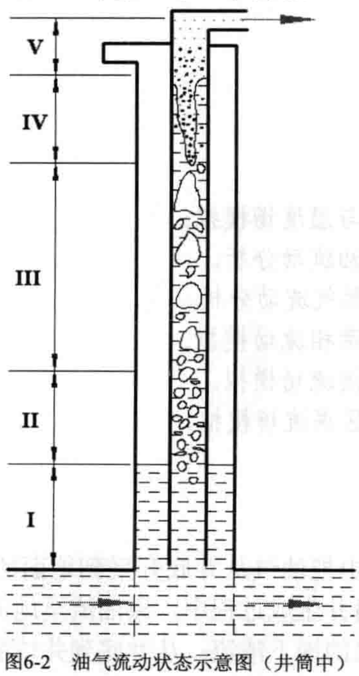


图6-2　油气流动状态示意图（井筒中）

可见，采油气时涉及的流体流动问题复杂多样，流体的流动规律对油气的开采有重大的影响，所以，开展流体流动规律研究是非常重要的，但是这方面的实验成本高、代价大，且具有高风险，CFD 仿真技术便成了很好的选择。下面就采油气工程中出现的几个典型问题进行分析，帮助读者掌握利用 FLUENT 解决采油气工程问题的方法及过程。

6.2 井下节流流场与温度场模拟

6.2.1 案例简介与思路分析

在气井开采过程中，通常利用节流装置来控制油气井的产量，给地层一个回压，使其免受伤害，阻止上游传播（临界流动）的下游扰动，以及在高流动压力下保护地面设备，以免腾涌。目前，国内外普遍采用的是在井底处安装节流装置，这种节流降压方法有助于稳定气井产量、延长气井开采寿命，同时降低井底气体压力，减少井口和传输管线承受负荷。因此研究节流阀的降压效果，对实际生产具有积极的意义。

【案例简介】

节流阀经常放置在输气管路与气井中起降压作用，其降压效果如何？是否会导致温度、速度发生变化呢？下面我们以甲烷流经节流阀为例进行模拟，节流阀尺寸如图 6-3 所示。节流阀安装深度为井下 2000m，节流阀进口压强为 10MPa，温度为 60℃，出口压强为 5MPa，温度为 59.9℃。

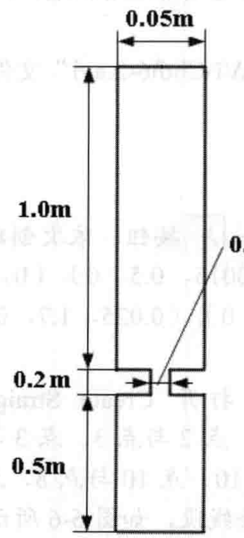


图6-3　井下节流阀模型示意图

【思路分析】

首先在 Gambit 中建立二维模型及网格，导入 FLUENT 后，调用 Realizable k-ε 模型，并定义甲烷气体为可压缩气体（即设置其密度为理想气体格式），整个模拟计算的流程如图 6-4 所示。



图6-4　井下节流阀模拟流程图

起始文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\udf.c”文件。

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\6-2.msh、6-2.cas、6-2.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch6\6-2.avi”文件。

6.2.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击→→按钮，依次创建坐标（0，0，0）、(0.025，0，0)、（0.025，0.5，0）、（0.0015，0.5，0）、（0，0.5，0）、（0.025，0.7，0）、（0.0015，0.7，0）、（0，0.7，0）、（0.025，1.7，0）和（0，1.7，0）共 10 个点，如图 6-5 所示。
2. 单击→→按钮，打开 Create Straight Edge 面板，创建点 1（vertix.1）与点 2（vertix.2）、点 2 与点 3、点 3 与点 4、点 4 与点 7、点 7 与点 6、点 6 与点 9、点 9 与点 10、点 10 与点 8、点 8 与点 5、点 5 与点 1、点 4 与点 5 和点 7 与点 8 共 12 条线段，如图 6-6 所示。
3. 将线段 1、线段 2、线段 3、线段 10、线段 11 组成一个面，线段 4、线段 9、线段 11、线段 12 和线段 5、线段 6、线段 7、线段 8、线段 12 分别组成两个面。单击→→按钮，在 Create Face from Wireframe 面板的 Edge 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何面。本例生成的三个面如图 6-7 所示。



图6-5　绘制好的点



图6-6　绘制的线段

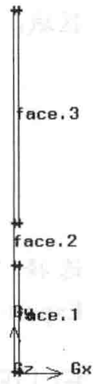


图6-7　绘制好的面

6.2.3　网格划分

1. 单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 黄色输入栏中选中线段 1、线段 7，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 50，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。按照同样的方法，将线段 2、线段 10 分为 1000 段；将线段 6、线段 8 分为 2000 段；将线段 3、线段 5 分为 40 段；将线段 4、线段 9 分为 400 段；将线段 11、线段 12 分为 9 段，划分好的线网格如图 6-8 所示。
2. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的面 1 和面 3，运用 Tri 单元与 Pave 方法对这两个面进行划分，其他设置保持默认。选中已经完成线网格划分的面 2，运用 Quad 单元与 Map 方法对其进行划分，其他设置保持默认，其生成的面网格如图 6-9 所示，此网格体现了在突变部位网格细分的效果。



图6-8　线网格的划分

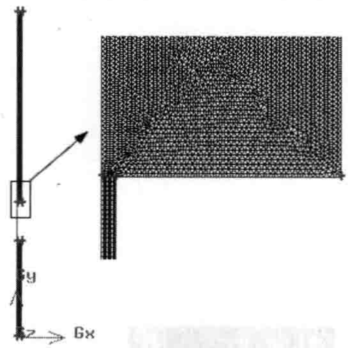


图6-9　面网格的划分

3. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将线段 1 定义为压力入口（PRESSURE_INLET），名称为 in；将线段 7 定义为压力出口（PRESSURE_OUT），名称为 out；将线段 2、线段 3、线段 5、线段 6 定义为壁面（WALL），名称为 bi-mian；将线段 8、线段 9、线段 10 定义为轴（SYMMETRY），名称为 zhou；线段 11 和线段 12 不做定义，表示其为内部

区域，定义好的边界如图 6-10 所示。

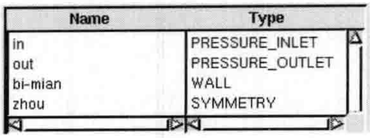


图6-10 定义好的边界类型

4. 选择 File→Save As 命令，将工程文件保存为“6-2”。同时，选择 Export→Mesh 命令，输出网格文件为 6-2.msh。

6.2.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→ Read→ Mesh 命令，读入 6-2.msh 文件。在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。
3. 单击 Problem Setup 面板的 General 中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。
4. 本例需要启动能量方程进行计算。单击 Problem Setup 的 Models，双击 Energy，弹出图 6-11 所示的 Energy 对话框，选中 Energy Equation 复选框，单击 OK 按钮。本例的甲烷速度较大，故应为湍流流动。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，在弹出的图 6-12 所示的 Viscous Model 对话框中选中 k-epsilon（2 eqn）单选按钮，在 k-epsilon Model 选项下选择 Realizable 单选按钮，选中 Options 栏中的 Viscous Heating 单选按钮（启用粘热效应），其他所有选项保持默认，单击 OK 按钮。

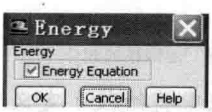


图6-11 选择能量方程

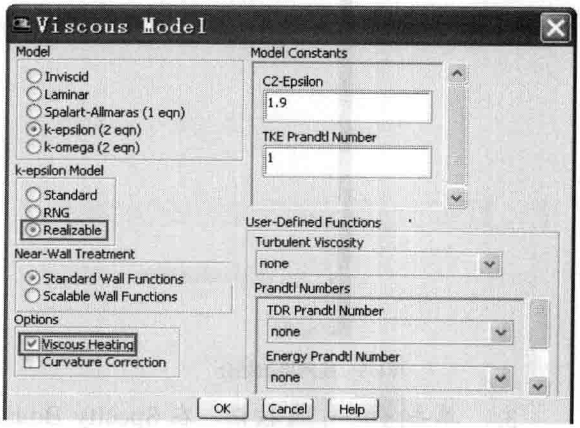


图6-12 Viscous Model 对话框

5. 本例流体为甲烷，故需要调用 FLUENT 自带的材料数据库。单击 Materials 右侧的 FLUENT Database... 按钮，在弹出的 Fluent Fluid Materials 对话框中，利用滚动条选择 Fluent Database Materials 列表中的 methane[ch4]，单击 Copy 按

钮。最后单击两次 Close 按钮，关闭 Fluent Fluid Materials 对话框与 Materials 对话框。

6. 由于天然气在高压下是可压缩的，因此本例将其流动当作可压缩流动来考虑。选中 Materials 对话框中的 methane，在弹出的对话框中改变其 Density（密度）为 ideal-gas，如图 6-13 所示。

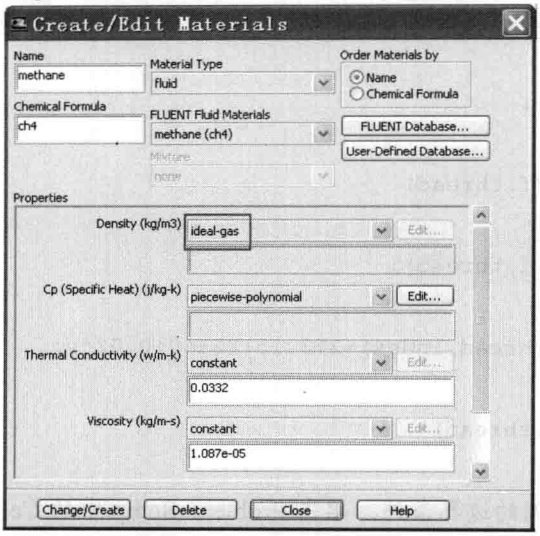


图6-13　Create/Edit Materials 对话框

7. 单击 FLUENT Database... 按钮，在弹出的 Fluent Fluid Materials 对话框中，将 Material Type 改为 solid，利用滚动条选择 Fluent Solid Materials 列表中的 steel，单击 Copy 按钮。最后单击两次 Close 按钮，关闭 Fluent Solid Materials 对话框与 Materials 对话框。

8. 单击 Problem Setup 下的 General，单击 Solver 下方的 Units... 按钮，打开 Set Units 对话框，如图 6-14 所示。选择 Quantities 中的 pressure，在 Units 中可以看到目前工程中关于压强的单位。单击 New... 按钮，在弹出的图 6-15 所示的 Define Unit 对话框中的 Unit 中输入名称 mpa，在 Factor 中输入 1000000，单击 OK 按钮，定义压强的新单位为 MPa。选择 Quantities 中的 Temperature，FLUENT 默认的温度单位为 K，这里我们选择 c，单击 OK 按钮。

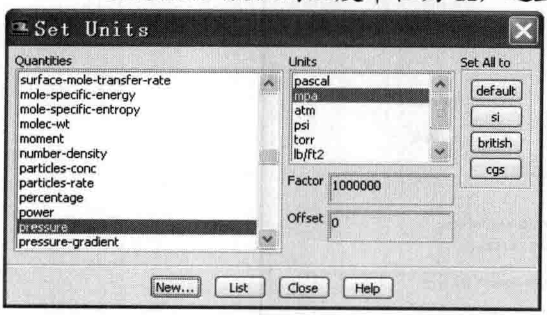


图6-14　Set Units 对话框

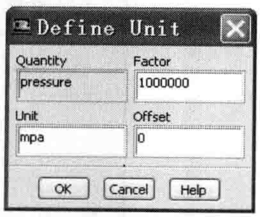


图6-15　Define Unit 对话框

9. 选择 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框，

保持默认设置，单击 OK 按钮。

10. 本例要用到 UDF 来定义井壁的地温覆梯度函数，因此打开 VC++程序编辑器，输入下面的 UDF 程序，保存为"udf.c"文件，并放置在工作目录下。

```
#include"udf.h"
DEFINE_PROFILE(WALL_bimian,thread,index)
{
face_t f;
real x[ND_ND];
real y;
begin_f_loop(f,thread)
{
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
F_PROFILE(f,thread,index)=273.15+22+40+0.02*y;
}
end_f_loop(f,thread)
}
```

11. 接下来定义本例的边界条件。单击 Problem Setup 中的 Cell Zone Conditions，双击其面板中的 fluid，在弹出的 Fluid 对话框中，在 Material Name 右侧的下拉列表中选择 methane，保持其他选项不变，单击 OK 按钮。

12. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在 Zone 区域中选择 in，其 Type 类型为 Pressure-inlet，单击 Edit... 按钮。在 Gauge Total Pressure（mpa）右侧输入 10，在 Supersonic/Initial Gauge Pressure（mpa）中输入 9.99，如图 6-16 所示。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity（%）为 1，Hydraulic Diameter（m）为 0.05。在 Thermal 选项卡中，将温度设为 60℃，如图 6-17 所示，单击 OK 按钮。

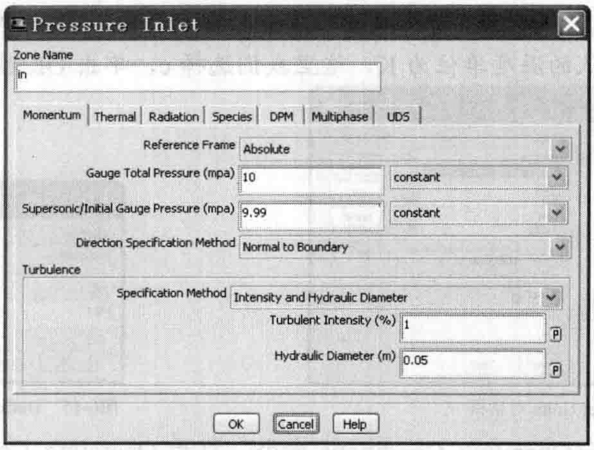


图6-16 Pressure Inlet 对话框

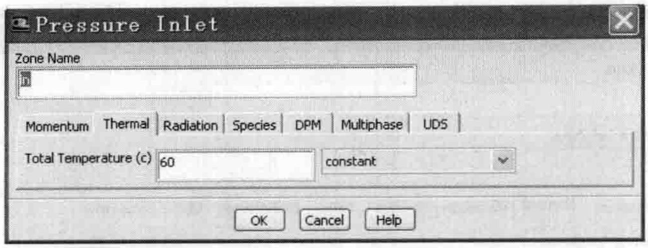


图6-17　Thermal 选项卡

13. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在 Zone 区域中选择 out，其 Type 类型为 Pressure-outlet，单击 Edit... 按钮。在 Gauge Pressure（mpa）右侧输入 5，如图 6-18 所示。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulence Intensity（%）为 1，Backflow Hydraulic Diameter（m）为 0.05。在 Thermal 选项卡中，将温度设为 59.9℃，如图 6-19 所示，单击 OK 按钮。

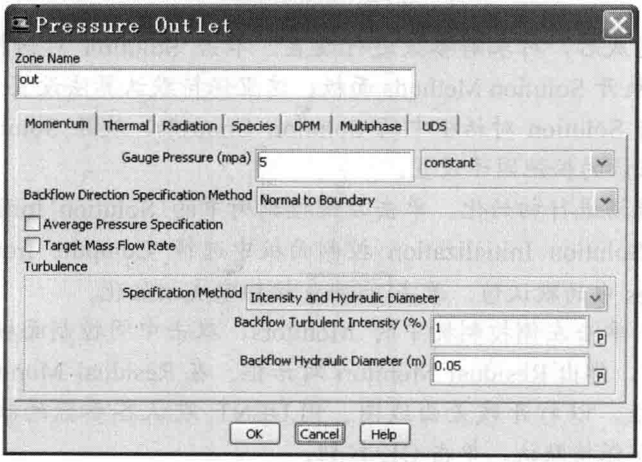


图6-18　Pressure Outlet 对话框

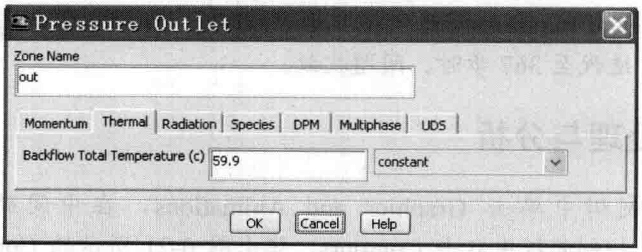


图6-19　Thermal 选项卡

14. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 bi-mian，其 Type 类型为 Wall，单击 Edit... 按钮，打开图 6-20 所示的 Wall 对话框。选择对话框中的 Thermal 选项卡，设置 Thermal Conditions 为 Temperature，然后选择 Temperature（c）下拉列表中的 udf WALL_bimian，即调用了地温梯度函数。另外，选择左下角 Material Name 下拉列表中的 steel，表示壁面材料为钢管，单击 OK 按钮。

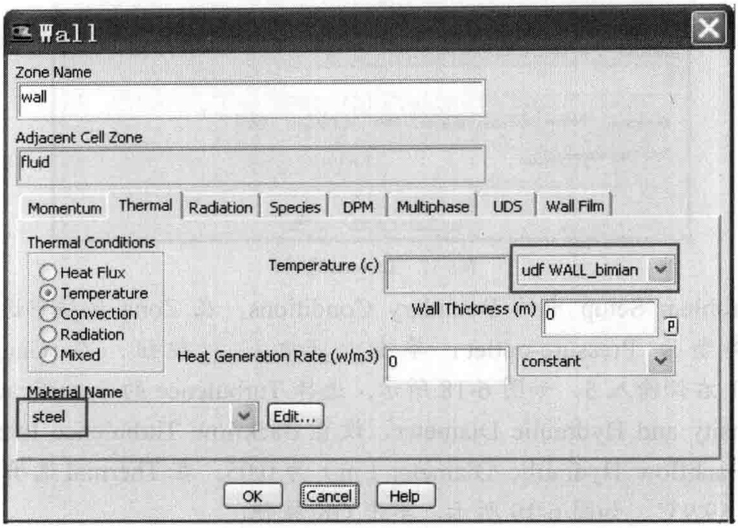


图6-20 Wall 对话框

15. 边界定义完成后，对求解参数进行设置。单击 Solution 对话框中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认算法设置。
16. 接下来单击 Solution 对话框中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。
17. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中选择 Compute from 为 in，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮完成初始化。
18. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的 "Residuals-Print, Plot"，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框选中 Plot 复选框，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
19. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 按钮开始解算。迭代至 367 步时，问题收敛。

6.2.5 结果后处理与分析

1. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 6-21 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Temperature，选中 Options 下方的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，得到图 6-22 所示的温度分布云图。
2. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下方的 Velocity，选中 Options 下方的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，得到图 6-23 所示的速度分布云图。

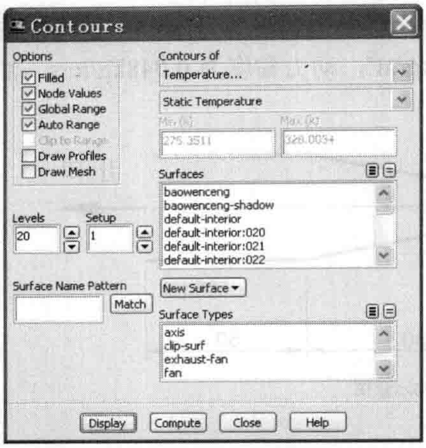


图6-21　Contours 对话框

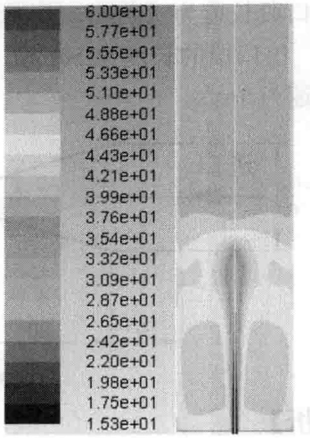


图6-22　温度分布云图

3. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下方的 Pressure，单击 Display 按钮，得到图 6-24 所示的压强分布云图。

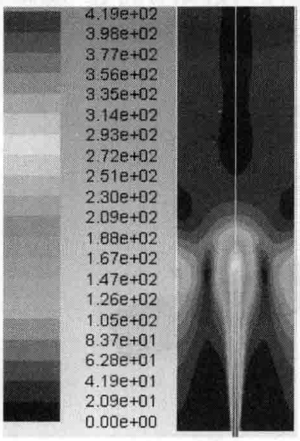


图6-23　速度分布云图

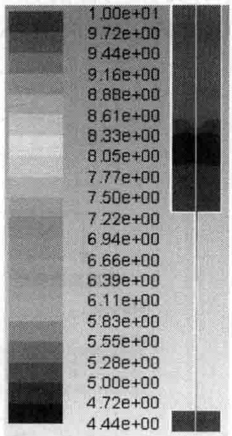


图6-24　压强分布云图

4. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（6-2.cas 和 6-2.dat）。
5. 最后，选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

6.3 文丘里管内原油流动分析

文丘里管在采油工程中被广泛应用，水力射流泵采油即是利用了文丘里管压降的原理。另外，文丘里流量计也是管输中运用较多的流量监测装置。研究文丘里管内油/气的流动，有助于更好地利用文丘里管来举升油流或计量流量。

6.3.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 6-25 所示，水平放置的文丘里管入口和出口的直径为 15mm，喉部的直径为

3mm，入口段长度为 10mm，收缩段的长度为 20mm，喉部的长度为 12mm，扩张段的长度为 30mm，出口段的长度为 50mm，油品密度为 960kg/m^3，动力黏度为 0.048kg/m·s，油品入口处的流速为 1m/s。

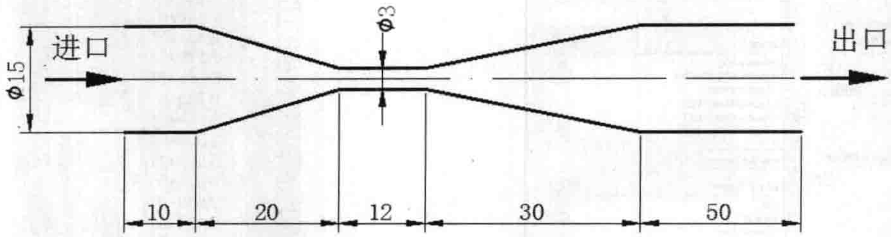


图6-25 文丘里管尺寸结构示意图

【思路分析】

本例为三维的单相流动模拟，首先要建立三维模型，文丘里管模型可由 ANSYS 自带的 DM 模块建立，也可由其他 CAD 软件绘制，导入到 DM 中进行流体填充以及边界的命名。本例将直接给出文丘里管的几何文件，导入 DM 即可。网格的划分可在 ANSYS 自带的 Meshing 模块中进行，在 FLUENT 中需调用湍流模型，具体流程如图 6-26 所示。

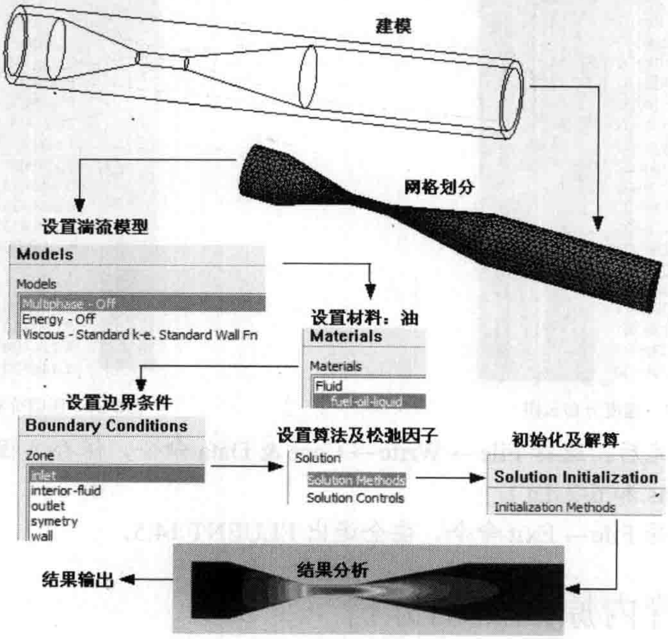


图6-26 文丘里管内原油流动模拟流程

起始文件——参见附带光盘中的“START\Ch6\wenqiuliguan.x_t”文件。

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\6-3.msh、6-3.cas、6-3.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch6\6-3.avi”文件。

6.3.2 几何建模

1. 双击 Workbench 14.5 图标，进入 Workbench 14.5 的工作环境。在 Workbench 14.5 的工具箱 Toolbox→Analysis Systems 中，双击 Fluid Flow（Fluent）或直接拖入项目视图区 Project Schematic，生成项目 A，如图 6-27 示。双击项目 A 中的 Geometry，选择单位标准为 millimeter，如图 6-28 所示，单击 OK 按钮，进入 DM 工作界面。

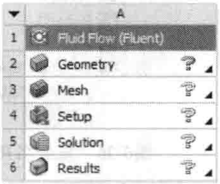


图6-27 项目 A

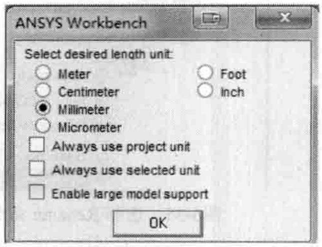


图6-28 DM 单位选择

2. 导入几何文件生成几何体。选择 File→Import External Geometry File 命令，如图 6-29 所示，在弹出的文件选择对话框中，选择几何文件 wenqiuliguan.x_t，单击“打开”按钮，导入几何文件。如图 6-30 所示，在 Tree Outline 模型树下出现导入的几何体 Import1，单击 Generate 按钮，生成图 6-31 所示的文丘里管几何体。

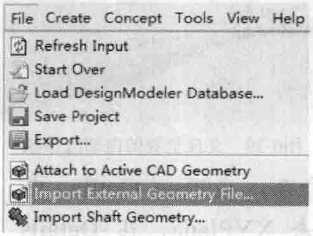


图6-29 File 菜单

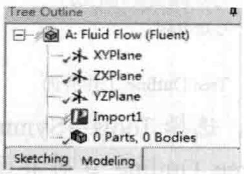
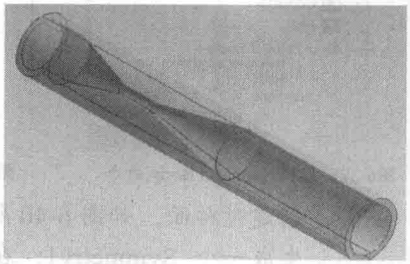


图6-30 Tree Outline 工作界面


图6-31 导入的文丘里管

3. 生成流体区域。选择 Tools→Fill 命令，如图 6-32 所示。按住 Ctrl 键，选中文丘里管的所有内表面，如图 6-33 所示，共计 10 个面。在模型树下 Details View 窗口的 Details of Fill1 的 Faces 处单击 Apply 按钮，可看到 10 个面，如图 6-34 所示。单击 Generate 按钮，生成名为 Solid 的几何体。

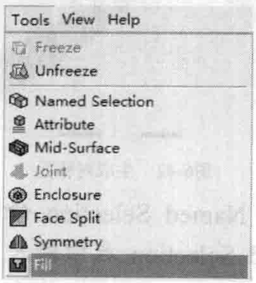
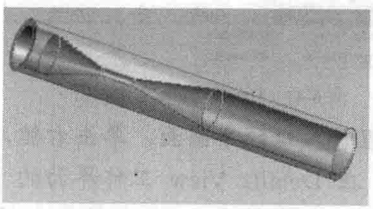


图6-32 Tools 菜单


图6-33 选中文丘里管内表面

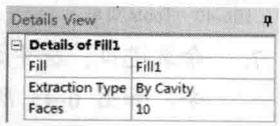


图6-34 Details View 工作界面

4. 重命名几何体。右击模型树中刚刚生成的名为 Solid 的几何体，在弹出的菜单中选择 Rename 命令，如图 6-35 所示。输入几何体名称 Fluid，重命名该几何体，如图 6-36 所示。

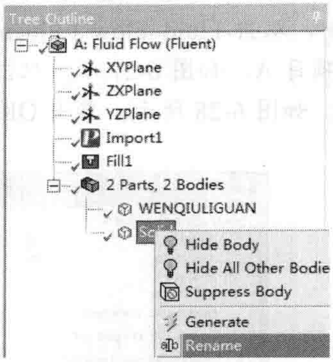


图6-35 选择 Rename 命令

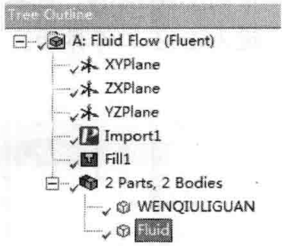


图6-36 重命名几何体

5. 抑制几何体。在模型树下右击几何体 WENQILIGUAN，在弹出的菜单中选择 Suppress Body 命令，如图 6-37 所示，抑制该几何体。此时图形显示区域仅显示文丘里管内部的流体计算区域，如图 6-38、图 6-39 所示。

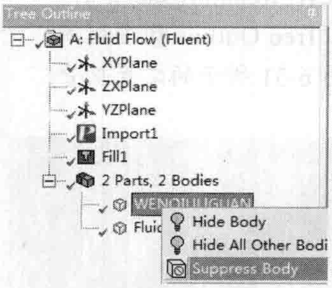


图6-37 选择 Suppress Body 命令

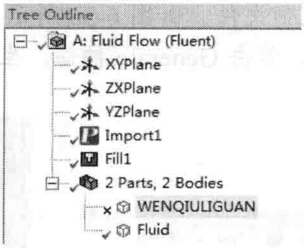


图6-38 Tree Outline 工作界面

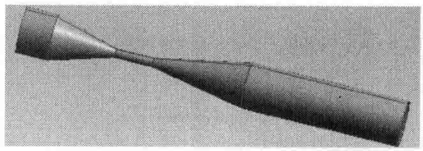


图6-39 文丘里管的内部流体域

6. 创建对称面。如图 6-40 所示，选择 Tools→Symmetry 命令，在 Tree Outline 中生成一个 Symmetry1；在 Tree Outline 工作界面上单击 XYPlane，在 Details View 工作界面上单击 Apply 按钮，如图 6-41 所示，单击 Generate 按钮，结果如图 6-42 所示。

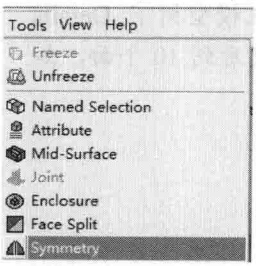


图6-40 Tools 菜单

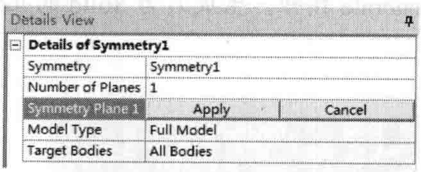


图6-41 Details View 工作界面

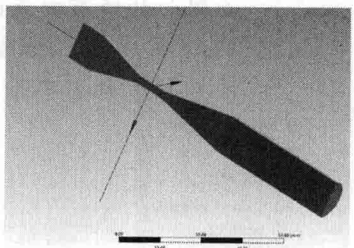


图6-42 生成对称面

7. 命名进口。选中文丘里管入口的半圆面，单击右键，选择 Named Selection 命令，如图 6-43 所示；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 inlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-44 所示，单击 Generate 按钮。

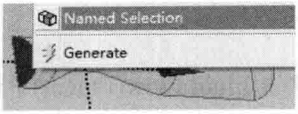


图6-43　选择 Named Selection 命令

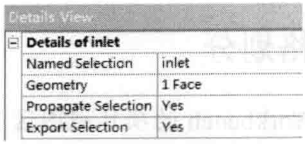


图6-44　Details View 工作界面

8. 命名出口。如图 6-45 所示，选中文丘里管出口的半圆面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 outlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-46 所示，单击 Generate 按钮。

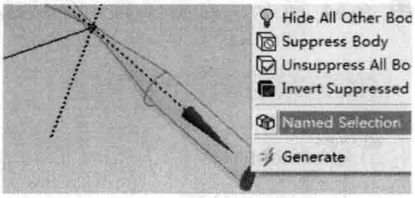


图6-45　选择 Named Selection 命令

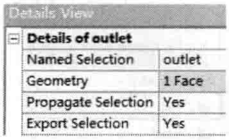


图6-46　Details View 工作界面

9. 命名壁面。如图 6-47 所示，按住 Ctrl 键，选中文丘里管的侧面，共计 5 个面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 walls，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-48 所示，单击 Generate 按钮。

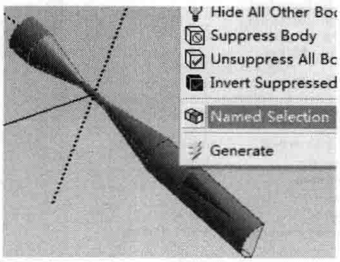


图6-47　选择 Named Selection 命令

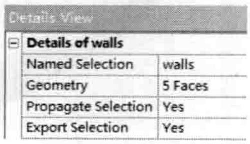


图6-48　Details View 工作界面

10. 命名对称面。如图 6-49 所示，选中文丘里管中心对称面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 symetry，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-50 所示，单击 Generate 按钮。

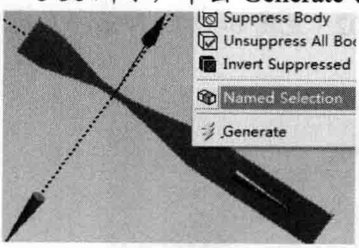


图6-49　选择 Named Selection 命令

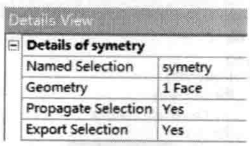


图6-50　Details View 工作界面

11. 选择 File→Export 命令，保存几何文件 6-3.agdb；选择 File→Exit 命令，安全退出。

6.3.3 网格划分

1. 在 Workbench 的项目视图区 Project Schematic，双击 Fluid Flow(Fluent)中的 A3 选项 Mesh（见图 6-51），进入网格划分的工作界面。
2. 设置几何体网格划分方法。在 Outline 工作界面上，右击 Mesh，在弹出的菜单中选择 Insert→Method 命令（见图 6-52）。在图像显示区域选中该几何体（见图 6-53），在 Outline 工作界面选中刚刚插入的 Automatic Method，在下面的 Details of “Automatic Method”-Method 工作界面中保持 Scoping Method 为 Geometry Selection，其他选项保持默认，如图 6-54 所示，在图像显示区域选中该几何体，单击 Apply 按钮。

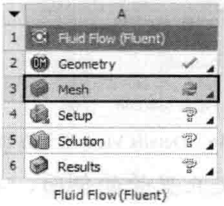


图6-51 Project Schematic 项目视图区

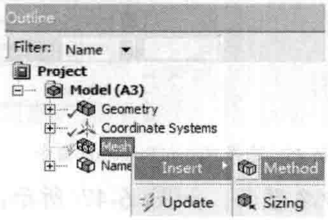


图6-52 添加（网格划分）方法

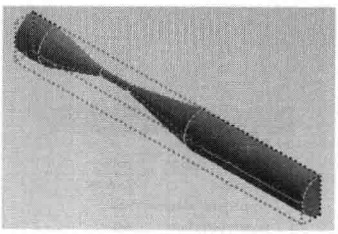


图6-53 选择几何体

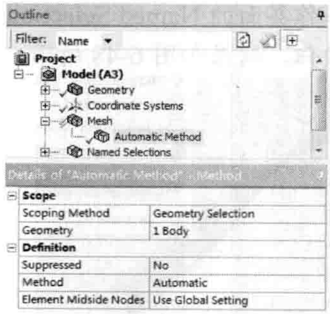


图6-54 Details of “Automatic Method”-Method 工作界面

3. 插入膨胀。在 Outline 工作界面中选中 Automatic Method，单击右键，在弹出的菜单中选择 Inflate This Method 命令（见图 6-55），在图像显示区域，按住 Ctrl 键单击选取几何体的壁面（见图 6-56），在 Outline 下方出现的 Details of “Inflation”-Inflation 工作界面中单击 Apply 按钮，并设置 Inflation Option 为 First Layer Thickness，First Layer Height 为 0.0002（见图 6-57），即第一层边界厚度为 0.0002m。

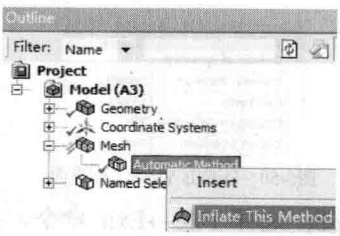


图6-55 添加膨胀

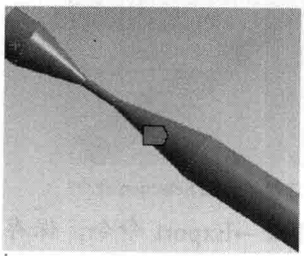


图6-56 选取几何体壁面

4. 在 Outline 工作界面上，单击 Mesh，在 Outline 下方出现的 Details of “Mesh” 中设置参数，如图 6-58 所示。单击工具栏中的 Generate Mesh 按钮生成网格，流体域划分网格如图 6-59 所示。

Details of "Inflation" - Inflation

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	5 Faces
Inflation Option	First Layer Thickness
First Layer Height	.0002
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre

图6-57 Inflation 工作界面

Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Min Size	Default (1.7978e-005 m)
Max Face Size	Default (1.7978e-003 m)
Max Size	Default (3.5955e-003 m)
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	4.7124e-003 m

图6-58 Details of “Mesh”工作界面

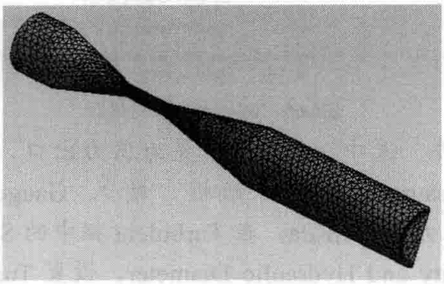


图6-59 网格划分结果

5. 选择 File→ Export 命令，保存网格文件 6-3.msh。

6.3.4 FLUENT 中的求解设置

1. 在 Workbench 14.5 的项目视图区 Project Schematic 的 A 工程中，双击 Setup，出现 Fluent Launcher 对话框，单击 OK 按钮，进入模型计算设置的工作界面。
2. 进行 General 设置。单击 General→Mesh→Scale，出现 Scale Mesh 对话框，查看几何尺寸，单击 Close 按钮；单击 Check 按钮，检查网格；单击 Close 按钮。
3. 进行 Model 设置。单击 Models→Viscous→Edit，出现 Viscous Model 对话框，在对话框中选中标准 k-ε 模型，其他参数保持不变，单击 OK 按钮。
4. 进行材料设置。单击 Meterials→Fluid→Create/Edit，出现 Create/Edit Materials 对话框，单击 Fluent Database 按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中选择 fuel-oil-liquid（c19h30<l>），单击 Copy 按钮，单击 Close 按钮。再单击 Create/Edit Materials 对话框中的 Close 按钮。
5. 单击 Cell Zone Conditions，在 Zone 列表中选中 fluid，单击 Edit 按钮，弹出

Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表中选中 fuel-oil-liquid，单击 OK 按钮。

6. 设置入口边界条件。单击 Boundary Conditions，选中 inlet，进口设置为速度进口，单击 Edit 按钮或双击 inlet，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置进口速度为 1m/s，在 Turbulent 栏中的 Specification Method 下拉列表中选择 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity 为 5%， Hydraulic Diameter 为 0.015（见图 6-60）。

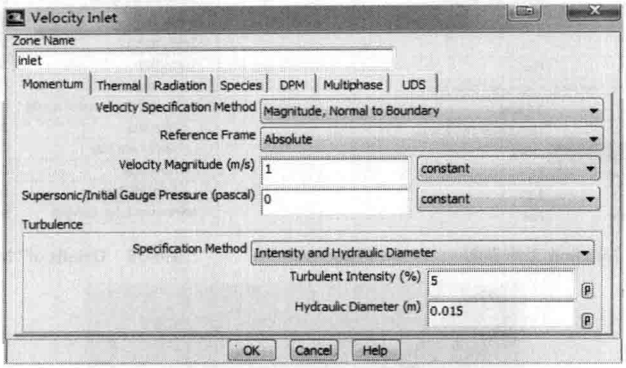


图6-60 Velocity Inlet 对话框

7. 设置出口边界条件。选中 outlet，设置为压力出口，单击 Edit 按钮或双击 outlet，弹出 Pressure Outlet 对话框，输入 Gauge Pressure（pascal）为 400000，即出口压力为 0.4MPa，在 Turbulent 栏中的 Specification Method 下拉列表中选择 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity 为 5%，Hydraulic Diameter 为 0.015（见图 6-61）。

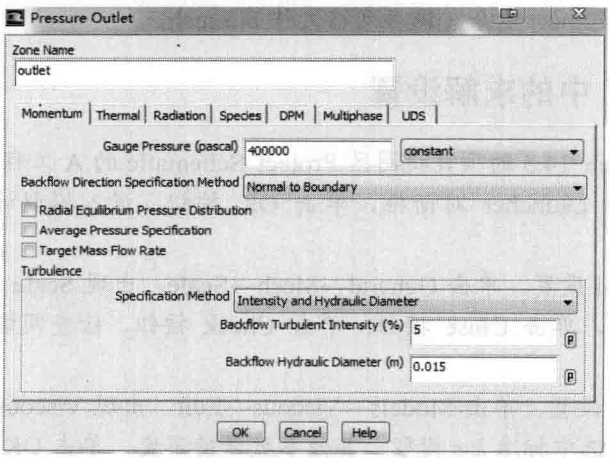


图6-61 Pressure Outlet 对话框

8. 单击 Solution Methods 设置求解方法，这里保持默认，单击 Solution Controls 设置迭代松弛因子，这里保持默认。

9. 单击 Monitors→“Residuals-Print,plot”，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，设置解算的残差曲线。选中 plot 以打开残差曲线图，将 continuity、x-velocity、y-velocity、z-velocity 的收敛精度设为 0.00001，其他保

持默认，单击 OK 按钮。

10. 选择 File→Export→Case 命令，保存工程文件为 6-3.cas。
11. 单击 Solution Initialization 按钮进行初始化，在 Initialization Methods 选项框中选择 Standard Initialization，在 Compute from 下拉列表中选择 inlet，其他保持默认，单击 Initialize 按钮。
12. 单击 Run Calculation 按钮，设置 Number of Iterations 为 500，单击 Calculate 按钮开始解算。

6.3.5 结果后处理与分析

1. 单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Contours 双击或单击 Set Up 按钮，弹出 Contours 对话框，在 Options 中选中 Filled，在 Contours of 下拉列表中选择 Pressure，在 Surfaces 列表中选择 symetry，如图 6-62 所示，单击 Display 按钮，文丘里管中心对称面的压力云图如图 6-63 所示。

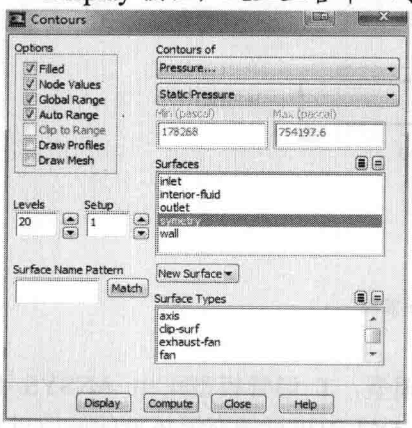


图6-62 Contours 操作面板

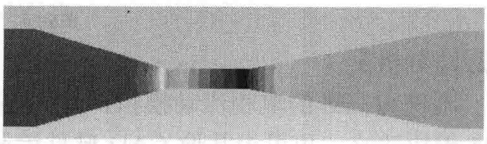


图6-63 文丘里管对称面的压力云图

2. 在 Contours of 下拉列表中选择 Velocity，单击 Display 按钮，文丘里管中心对称面的速度云图如图 6-64 所示。

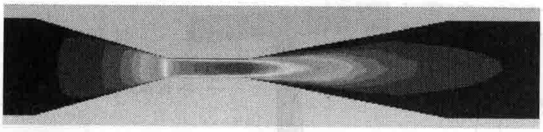


图6-64 文丘里管对称面的速度云图

3. 单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Vectors 双击或单击 Set Up 按钮，弹出 Vectors 对话框，在 Vectors of 下拉列表中选择 Velocity，在 Surfaces 列表中选择 symetry，单击 Display 按钮，文丘里管中心对称面的速度矢量图如图 6-65 所示。

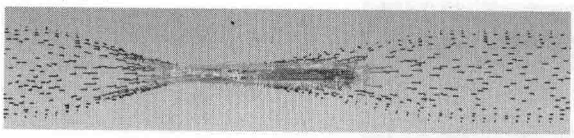


图6-65 文丘里管对称面的速度矢量图

4. 图形分析完后，选择 File→ Write→Data 命令，保存数据文件 6-3.dat。

5. 最后，选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

6.4 T 形管内天然气流动分析

T 形管在采油气工程中也比较常见，如井口采油树就是典型的 T 形管。天然气在 T 形管的流动情况与直管、弯管有何不同，气流经过 T 形管是否会造成流场突变和管道振动，这些都是工程中要密切关注的问题。

6.4.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 6-66 所示，T 形管的内径均为 55mm，横向管段长 800mm，在其中部连接的纵向管段长 500mm，天然气（甲烷）以 1m/s 的速度分别从左端的进口 1 和下端的进口 2 流入，交汇后从右端的出口流出。

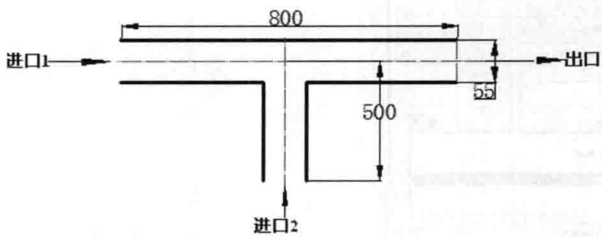


图6-66 T 形管的尺寸示意图

【思路分析】

本例为三维的单相流动模拟，首先要建立三维模型，T 形管模型可由 ANSYS 自带的 DM 模块建立，也可由其他 CAD 软件绘制，导入到 DM 中进行填充流体域的修改以及边界的命名。本例将直接给出 T 形管的几何文件，导入 DM 即可，网格的划分可在 ANSYS 自带的 Meshing 模块中进行，在 FLUENT 中设置为湍流模型，具体流程如图 6-67 所示。

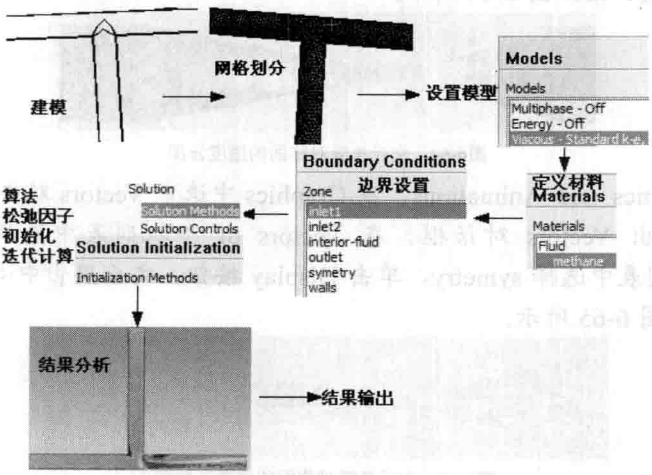


图6-67 T 形管内天然气流动分析模拟流程

起始文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\3dsantongguan.x_t”文件。

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\6-4.msh、6-4.cas、6-4.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch6\6-4.avi”文件。

6.4.2 几何建模

1. 双击 Workbench 14.5 图标，进入 Workbench 14.5 的工作环境，在 Workbench 14.5 的工具箱 Toolbox→Analysis Systems 中，双击 Fluid Flow（Fluent）或直接拖入项目视图区 Project Schematic，生成项目 A，如图 6-68 所示。双击项目 A 中的 Geometry，选择单位标准为 mm，单击 OK 按钮，进入 DM 工作界面。

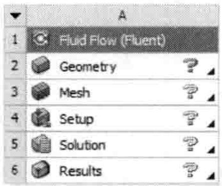


图6-68 Fluid Flow（Fluent）示意图

2. 导入几何文件生成几何体。选择 File→Import External Geometry File 命令，如图 6-69 所示，在弹出的文件选择面板中，选择几何文件 3dsantongguan.x_t，单击“打开”按钮，导入几何文件。如图 6-70 所示，在 Tree Outline 模型树下出现导入的几何体 Import1，单击 Generate 按钮生成图 6-71 所示 T 形管几何体。

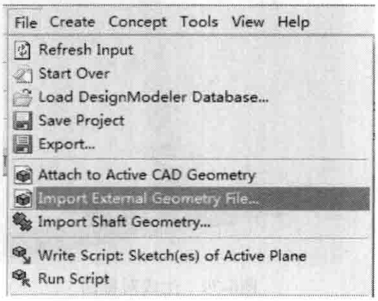


图6-69 File 菜单

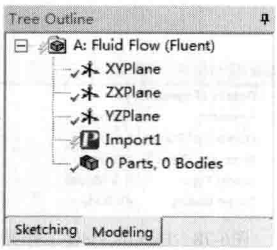


图6-70 Tree Outline 工作界面

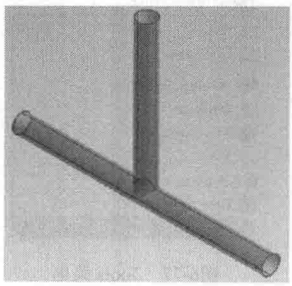


图6-71 导入的 T 形管

3. 生成流体区域。选择 Tools→Fill 命令，如图 6-72 所示，按住 Ctrl 键，选中 T 形管的所有内表面，如图 6-73 所示，共计 4 个面。在模型树下的 Details View 窗口中 Details of Fill1 的 Faces 处单击 Apply 按钮，结果如图 6-74 所示，单击 Generate 按钮生成名为 Solid 的几何体。右键单击模型树中刚刚生成的名为 Solid 的几何体，在弹出的菜单中选择 Rename 命令，输入几何体名称 fluid，重命名该几何体。

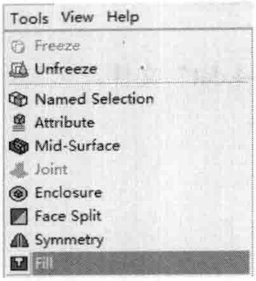


图6-72 Tools 菜单

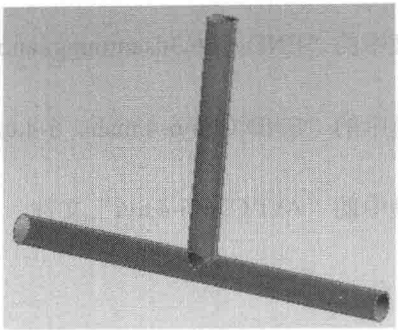


图6-73 选中 T 形管内表面

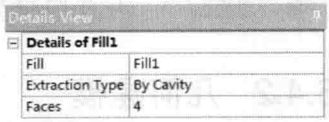


图6-74 Details View 工作界面

4. 抑制几何体。在模型树下右键单击几何体 3DSANTONGGUAN，在弹出的菜单中选择 Suppress Body 命令，如图 6-75 所示，抑制该几何体。此时图形显示区域仅显示 T 形管内部的流体计算区域，如图 6-76 所示。

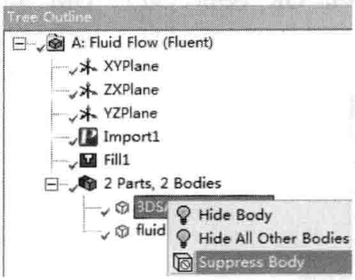


图6-75 选择 Suppress Body 命令

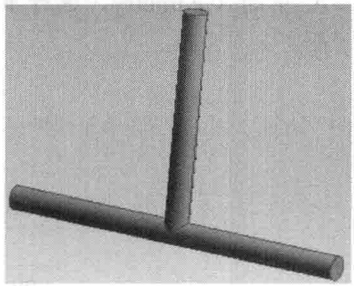


图6-76 T 形管内部流体域

5. 创建对称面。选择 Tools→Symmetry 命令（见图 6-77），在 Tree Outline 中生成一个 Symmetry1；在 Tree Outline 工作界面上单击 XYPlane，在 Details View 工作界面上单击 Apply 按钮，结果如图 6-78 所示，单击 Generate 按钮，结果如图 6-79 所示。

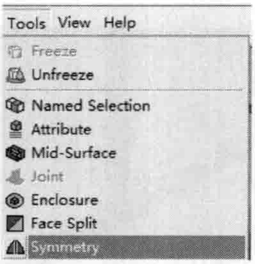


图6-77 Tools 菜单

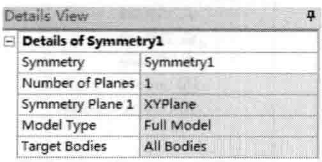


图6-78 Details View 工作界面

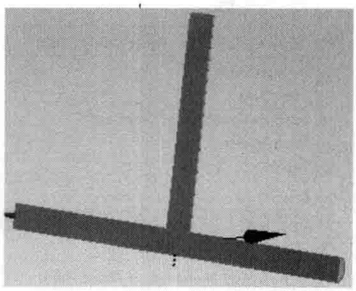


图6-79 生成对称面

6. 命名进口 1。如图 6-80 所示，单击左键选中 T 形管入口的半圆面，单击右键，选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 inlet1，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-81 所示，单击 Generate 按钮。

7. 命名进口 2。如图 6-82 所示，单击左键选中 T 形管入口的半圆面，单击右键，选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 inlet2，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-83 所

示，单击 Generate 按钮。

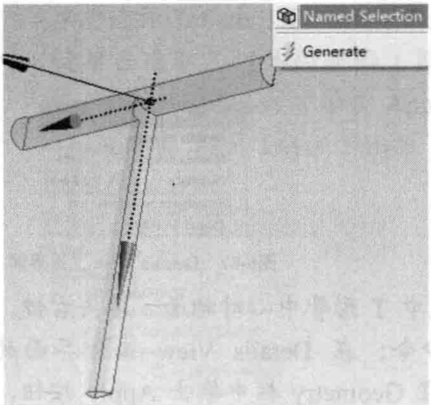
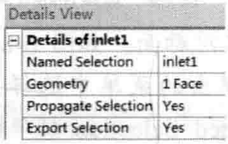


图6-80　选择 Named Selection 命令



Details View

Details of inlet1	
Named Selection	inlet1
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes

图6-81　Details View 工作界面

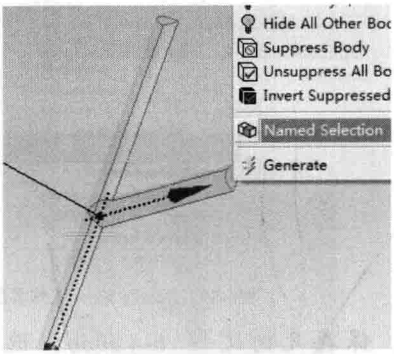
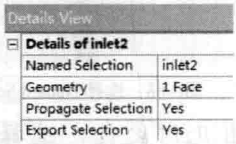


图6-82　选择 Named Selection 命令



Details View

Details of inlet2	
Named Selection	inlet2
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes

图6-83　Details View 工作界面

8. 命名出口。如图 6-84 所示，单击左键选中 T 形管出口的半圆面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 outlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-85 所示，单击 Generate 按钮。

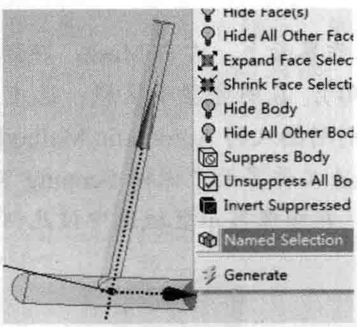
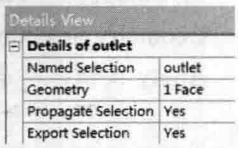


图6-84　选择 Named Selection 命令



Details View

Details of outlet	
Named Selection	outlet
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes

图6-85　Details View 工作界面

9. 命名壁面。如图 6-86 所示，按住 Ctrl 键，单击左键选中 T 形管的侧面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 walls，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-87 所示，单击 Generate 按钮。

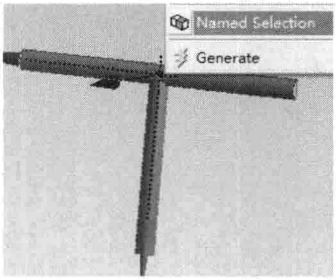


图6-86　选择 Named Selection 命令

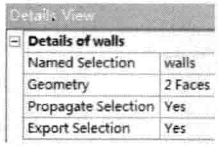


图6-87　Details View 工作界面

10. 命名对称面。如图 6-88 所示，单击左键选中 T 形管中心对称面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 symetry，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 6-89 所示，单击 Generate 按钮。

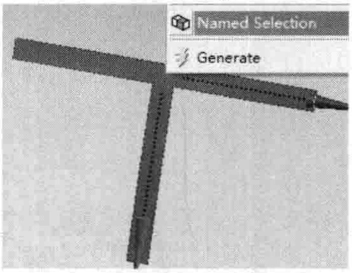


图6-88　选择 Named Selection 命令

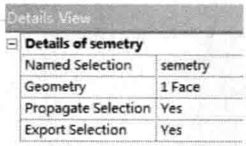


图6-89　Details View 工作界面

11. 输出几何文件，选择 File→Export 命令，保存几何文件 6-4.agdb；选择 File→Exit 命令，安全退出。

6.4.3 网格划分

1. 在 Workbench 的项目视图区 Project Schematic，双击 Fluid Flow(Fluent)中的 A3 选项 Mesh，进入网格划分的工作界面。
2. 设置几何体网格划分方法。在 Outline 工作界面上，右击 Mesh，在弹出的菜单中选择 Insert→Method 命令（见图 6-90）；在图像显示区域，选中该几何体（见图 6-91）；在 Outline 工作界面选中刚刚插入的 Automatic Method，在下面的 Details of "Automatic Method"-Method 工作界面中保持 Scoping Method 为 Geometry Selection，其他选项保持默认，在图像显示区域选中该几何体，单击 Apply 按钮，结果如图 6-92 所示。

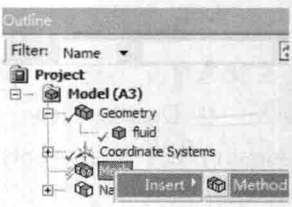


图6-90　添加（网格划分）方法

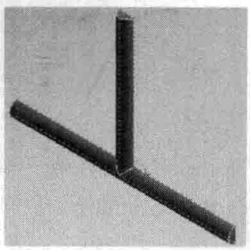


图6-91　选取几何体

3. 插入膨胀。在 Tree Outline 中选中 Automatic Method，单击右键，在弹出的菜单中选择 Inflate This Method 命令（见图 6-93），在图像显示区域，按住 Ctrl 键单击选取几何体的壁面（见图 6-94），在 Outline 下方出现的 Details of "Inflation"-Inflation 中单击 Apply 按钮，并设置 Inflation Option 为 First Layer Thickness，First Layer Height 为 0.0002，如图 6-95 所示，即第一层边界厚度为 0.0002m。

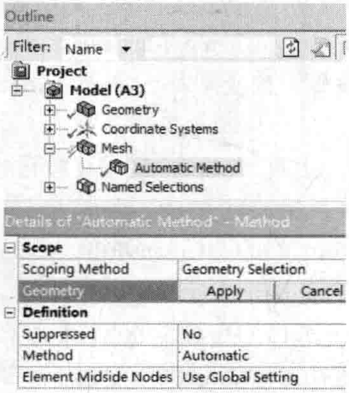


图6-92 Method 工作界面

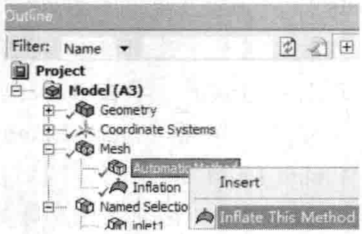
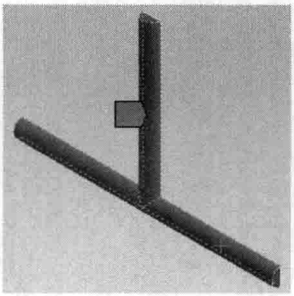


图6-93 添加膨胀


图6-94 选取几何体壁面

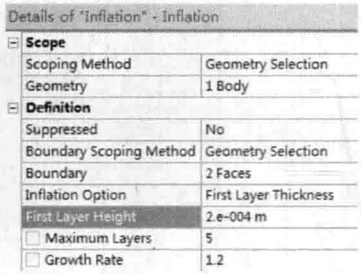


图6-95 Inflation 工作界面

4. 在 Outline 工作界面上，单击 Mesh，在 Outline 下方出现的 Details of "Mesh" 中设置参数，如图 6-96 所示；单击工具栏中的 Generate Mesh 按钮生成网格，流体域划分网格如图 6-97 所示。

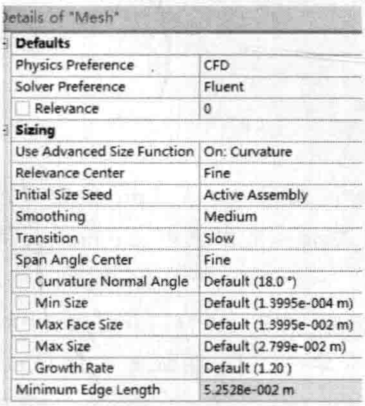
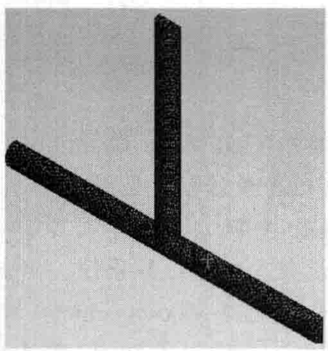


图6-96 Details of "Mesh"工作界面


图6-97 网格划分结果

5. 选择 File→ Export 命令，保存网格文件 6-4.msh。

6.4.4 FLUENT 中的求解设置

1. 在 Workbench 14.5 的项目视图区 Project Schematic 的 A 工程中，双击 Setup，出现 Fluent Launcher 对话框，单击 OK 按钮，进入模型计算设置的工作界面。
2. 进行 General 设置。单击 General→Mesh→Scale，出现 Scale Mesh 对话框，查看几何尺寸，单击 Close 按钮；单击 Check 按钮，检查网格；单击 Close 按钮。
3. 进行 Model 设置。单击 Models→Viscous→Edit，出现 Viscous Model 对话框，在该对话框中选中标准 k-ε 模型，其他参数保持不变，单击 OK 按钮。
4. 进行材料设置。单击 Meterials→Fluid→Create/Edit，出现 Create/Edit Materials 对话框，单击 Fluent Database，弹出 Fluent Database Materials 对话框，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中选择 methane（ch4）（见图 6-98），单击 Copy 按钮，单击 Close 按钮。再单击 Create/Edit Materials 对话框中的 Close 按钮。

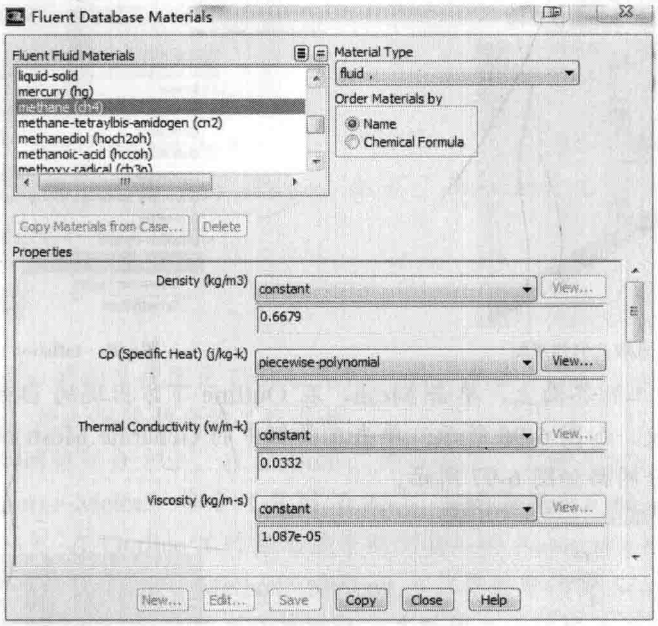


图6-98 Fluent Database Materials 对话框

5. 单击 Cell Zone Conditions，在 Zone 列表中选中 fluid，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框（见图 6-99），在 Material Name 下拉列表中选中 methane，单击 OK 按钮。
6. 设置入口 1 边界条件。单击 Boundary Conditions，选中 inlet1，在 Type 下拉列表中选择 velocity-inlet，进口设置为速度进口，单击 Edit 按钮或双击 inlet1，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置进口速度为 1m/s，在 Turbulent 栏中的 Specification Method 下拉列表中选择 Intensity and Hydraulic Diameter，设置

Turbulent Intensity 为 5%， Hydraulic Diameter 为 0.055（见图 6-100）。

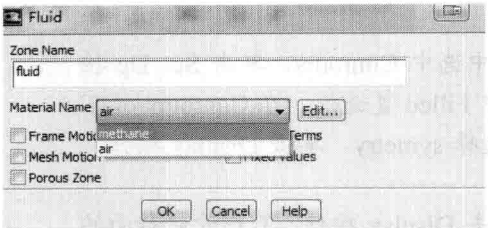


图6-99 Fluid 对话框

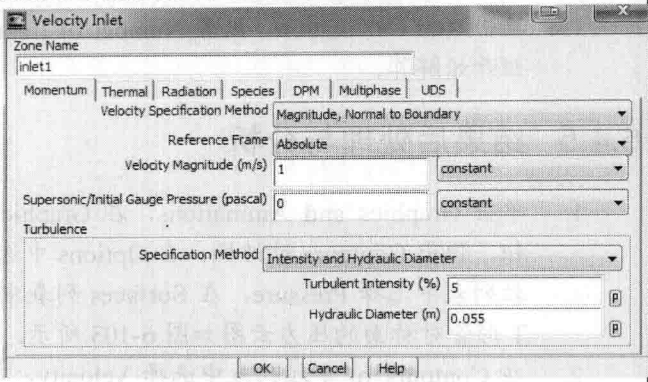


图6-100 Velocity Inlet 对话框

7. 设置入口 2 边界条件。单击 Boundary Conditions，选中 inlet2，在 Type 下拉列表中选择 velocity-inlet，进口设置为速度进口，单击 Edit 按钮或双击 inlet2，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置进口速度为 1m/s，在 Turbulent 栏中的 Specification Method 下拉列表中选择 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity 为 5%， Hydraulic Diameter 为 0.055（见图 6-101）。
8. 设置出口边界条件。选中 outlet，在 Type 下拉列表中选择 outflow，设置为自由流出出口，单击 Edit 按钮或双击 outlet，弹出 Outflow 对话框，输入 Flow Rate Weighting 为 1（见图 6-102）。

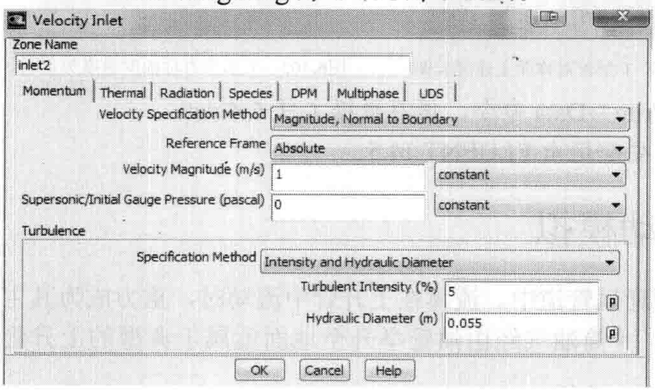


图6-101 Velocity Inlet 对话框

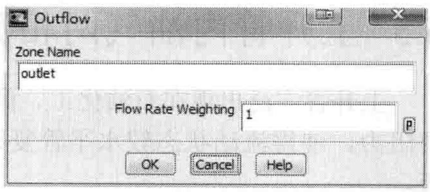


图6-102 Outflow 对话框

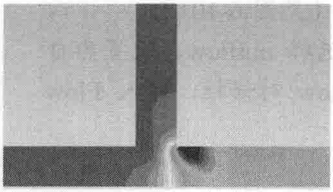
9. 单击 Solution Methods 设置求解方法，这里保持默认，单击 Solution Controls 设置迭代松弛因子，这里保持默认。
10. 单击 Monitors→ “Residuals-Print,plot”，单击 Edit 按钮，弹出 Reidual Monitors 对话框，设置解算的残差曲线，选中 plot 以打开残差曲线图，将 continuity、x-velocity、y-velocity、z-velocity 的收敛精度设为 0.00001，其他保持默认，单击 OK 按钮。
11. 选择 File→Export→Case 命令，保存工程文件为 6-4.cas。
12. 单击 Solution Initialization 进行初始化，在 Initialization Methods 选项框中选择 Standard Initialization，在 Compute from 下拉列表中选择 inlet，其他保持默

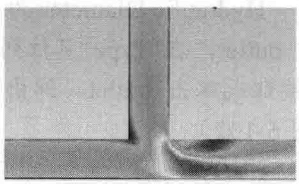
认，单击 Initialize 按钮。

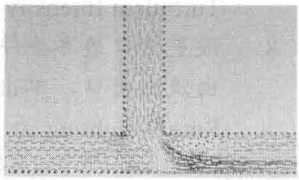
13. 单击 Run Calculation，设置 Number of Iterations 设置为 500，单击 Calculate 按钮开始解算。

6.4.5 结果后处理与分析

1. 单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Contours，单击 Set Up 按钮，弹出 Contours 对话框，在 Options 中选中 Filled 复选框，在 Contours of 下拉列表中选择 Pressure，在 Surfaces 列表中选择 symetry，单击 Display 按钮，T 形管对称面的压力云图如图 6-103 所示。
2. 在 Contours of 下拉列表中选择 Velocity，单击 Display 按钮。T 形管对称面的速度云图如图 6-104 所示。
3. 单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Vectors，单击 Set Up 按钮，弹出 Vectors 对话框，在 Vectors of 下拉列表中选择 Velocity，在 Surfaces 列表中选择 symetry，单击 Display 按钮，T 形管对称面的速度矢量图如图 6-105 所示。


图6-103　T 形管对称面的压力云图


图6-104　T 形管对称面上速度云图


图6-105　T 形管对称面的速度矢量图

4. 图形分析完后，选择 File→ Write→Data 命令，保存数据文件 6-4.dat。
5. 最后，选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

6.5 上升管内油气两相流动模拟

上升管广泛出现在石油化工、供暖通风管道中。流体在上升管中流动时，重力成为其主要阻力，使得流动状态较水平管复杂。井筒油气经由油管举升至地面就属于典型的上升管流。

6.5.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

这里我们就上升管内的气液两相流进行模拟分析，具体尺寸如图 6-106 所示。管道内径为 0.3m，模拟管道长度为 6m，油气两相流从下端入口进入，入口压力为 2atm，入口气相体积分数为 10%，出口处的压力为 1atm。

【思路分析】

本例涉及气液两相流，所以选用 VOF 模型，且启用非定常模型。管道的进出口分别定义为压力入口和压力出口，整个模拟计算的流程如图 6-107 所示。

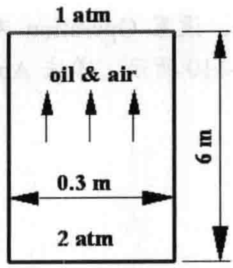


图6-106　上升管尺寸

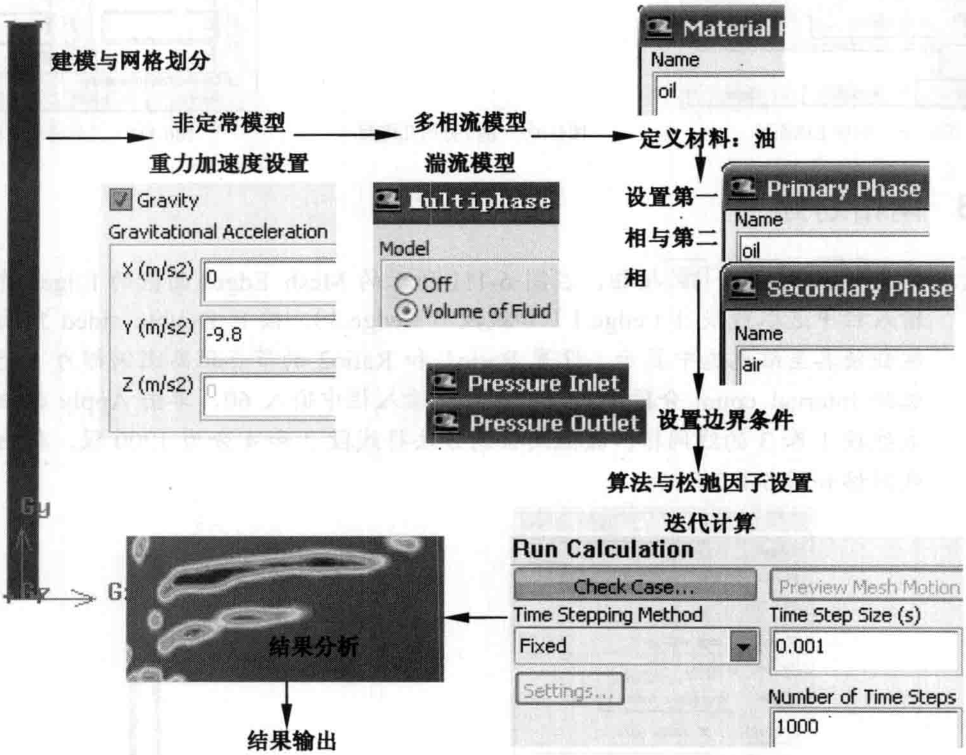


图6-107　上升管内气液两相流模拟流程图

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\6-5.msh、6-5.cas、6-5.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch6\6-5.avi”文件。

6.5.2 几何建模

1. 本例模型相对简单，只需启动 Gambit 软件，直接执行面建立命令。具体操作为：单击控制面板中的 → → 按钮，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 0.3 和 6，如图 6-108 所示。单击 Apply 按钮，即生成了图 6-109 所示的几何模型。
2. 单击控制面板中的 → → 按钮，在 Move/Copy Faces 面板中，选择已

建立的几何面，选择 Move，设置 Operation 为 Translate，在 Global 下的 y 方向输入框中输入 3，如图 6-110 所示，单击 Apply 按钮。

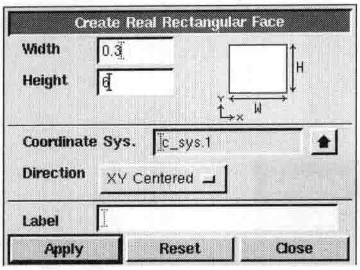


图6-108　矩形生成面板

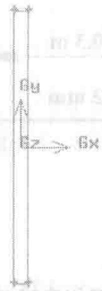


图6-109　建立好的几何面

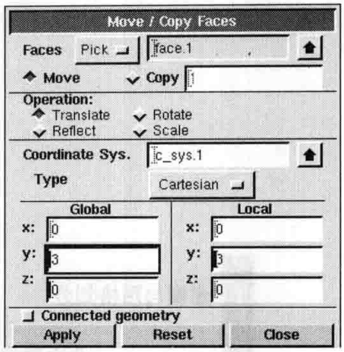


图6-110　几何移动面板

6.5.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在图 6-111 所示的 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选取线段 1（edge.1）和线段 3（edge.3），按下 Double sided 前面的按钮使其呈红色选中显示，设置 Ratio1 和 Ratio2 的节点距离比例都为 1.05，选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 60，单击 Apply 按钮生成线段 1 和 3 的线网格。按照同样的方法将线段 2 和 4 分为 1200 段，得出的线网格如图 6-112 所示。

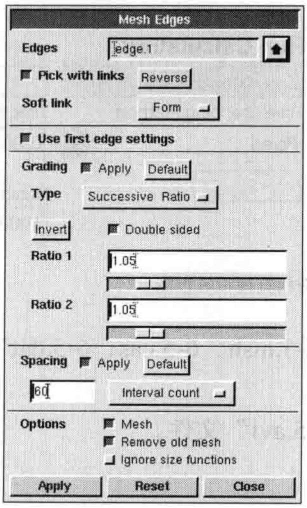


图6-111　线网格划分



图6-112　划分好的线网格

2. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，用 Shift+鼠标左键选中已经完成线网格划分的几何面，运用 Quad 单元与 Map 方法对该面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮，生成图 6-113 所示的面网格。
3. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将水平方向上的上下两条边分别定义为 Pressure-inlet 和 Pressure-outlet，如图 6-114 所示。

4. 网格划分完后，选择File→Export→Mesh命令，将网格输出为6-5.msh。



图6-113　生成好的面网格

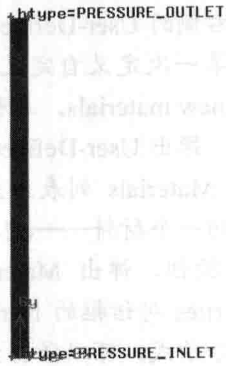


图6-114　边界类型定义

6.5.4 FLUENT 中的求解设置

1. 启动 FLUENT 14.5 2D 解算器。选择 File→ Read→ Mesh 命令，在弹出的 Select File对话框中选择6-5.msh文件，并将其导入至FLUENT 14.5中。单击 General 对话框 Mesh 中的 Check 按钮，检查网格，待文本窗口中出现 Done，表示模型网格合适。
2. 单击操 Problem Setup 的 General 中的 Scale，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。
3. 在 General 对话框的 Solver 下方选中 Gravity，并在 Y(m/s2)中输入–9.8，即考虑在Y轴负向存在重力加速度，如图6-115所示。
4. 单击 Problem Setup 的 Models，双击 Multiphase-Off，弹出图 6-116 所示的 Multiphase Model 对话框，选择 Volume of Fluid，设置 Volume Fraction Parameters 为 Explicit，并设置 Number of Eulerian Phases 为 2，单击 OK 按钮。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，选择 k-epsilon (2 eqn)，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。

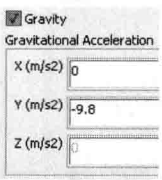


图6-115　设置重力加速度

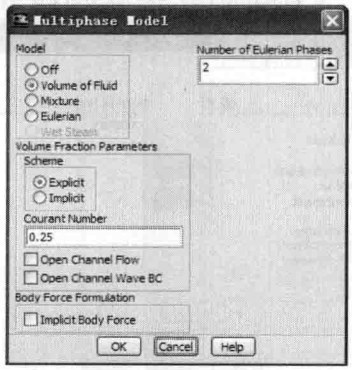


图6-116　Multiphase Model 对话框

5. 下面定义本例的材料——油。选择 Define→Materials 命令，弹出 Materials 对话框。FLUENT 默认的材料为空气（air），由于本例油为特殊材料，不属于

FLUENT 自带的材料数据库之列，故需要用户自定义材料。单击 Materials 对话框右侧的 User-Defined Database 按钮，此时会弹出 Open Database 对话框，若为第一次定义自定义材料数据库，需要用户输入数据库的名称，如本例输入的 new materials。名称输入完后，单击 OK 按钮，如图 6-117 所示。

6. 此时，弹出 User-Defined Database Materials 对话框，对话框中的 User-Defined Fluid Materials 列表为全空，表示尚未定义任何新材料。现在建立新材料数据库里的一个材料——oil，单击 User-Defined Database Materials 对话框最下方的 New 按钮，弹出 Material Properties 对话框，如图 6-118 所示。在 Material Properties 对话框的 Name 中输入油的名称 oil，保留 Formula 为空（若不知材料的分子式，可以保留为空），然后，选择 Types 类型为 fluid，并将 Available Properties 列表中的密度（Density）、黏度（Viscosity）移到右侧的 Material Properties 列表中。

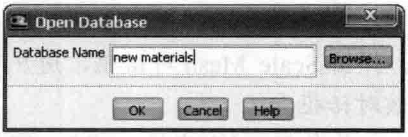


图6-117 Open Database 对话框

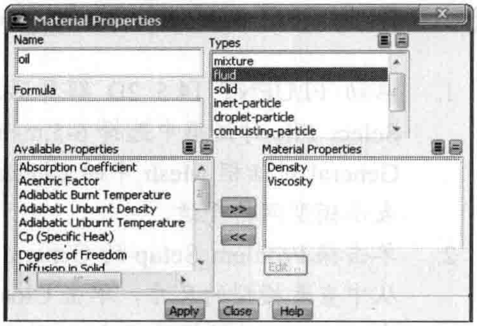


图6-118 Material Properties 对话框

7. 下面对密度和黏度进行定义。先选中 Material Properties 列表中的密度（Density），单击面板下侧的 Edit 按钮，弹出 Edit Property Methods 对话框。选择该对话框的 Available Properties 列表中的 constant，移入到右侧 Material Properties 列表中，并在左下方输入栏中输入 838，单击 OK 按钮，即将密度以常数形式定义为 838kg/m^3，如图 6-119 所示。按照同样的方式定义黏度（Viscosity），如图 6-120 所示。

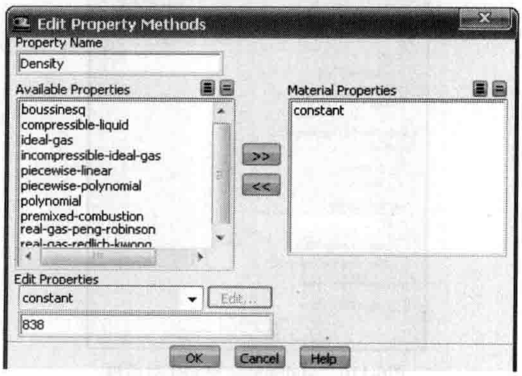


图6-119 密度定义

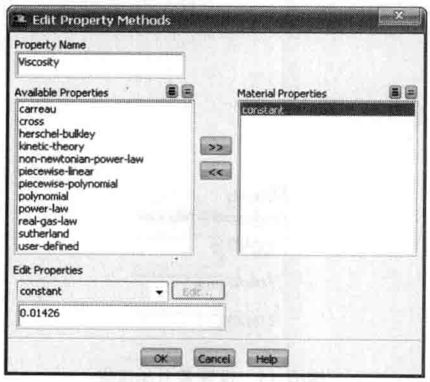


图6-120 黏度定义

8. 所有物性参数的数值定义完后，回到 Material Properties 对话框，单击 Apply 按钮和 Close 按钮。此时，User-Defined Database Materials 对话框中就已经有

了新材料 oil 了。单击 User-Defined Database Materials 对话框下侧的 Save 按钮，表示将定义好的新材料储存在自定义材料数据库中，以便以后调用。然后，单击 Copy，表示将材料由自定义数据库复制到当前工程中。最后，单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。至此，我们完成了新材料定义的整个过程。

9. 单击 Problem Setup 中的 Phases，双击 Phases 面板的 Phase-Primary Phase，弹出图 6-121 所示的 Primary Phase 对话框，改变 Name 为 oil，并选择 Phase Material（第一相材料）为 oil，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase，弹出图 6-122 所示的 Secondary Phase 对话框，改变 Name 为 air，并选择 Phase Material（第二相材料）为 air，单击 OK 按钮。

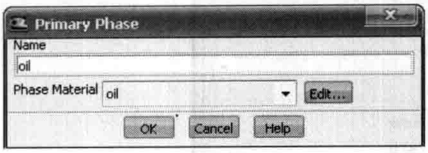


图6-121　第一相设置

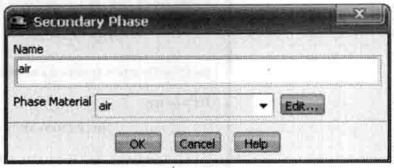


图6-122　第二相设置

10. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 in，保持下方 Phase 中的 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 6-123 所示。在 Gauge Total Pressure (pascal)中输入 101325，选择 Specification Method 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity (%)为 1，Hydraulic Diameter (m)为 0.3，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 pressure-inlet，改变下方 Phase 中的选择为 air，单击 Edit 按钮，再次弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 6-124 所示。选择 Multiphase 选项卡，在 Volume Fraction 中输入 0.1，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 Pressure-outlet，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，如图 6-125 所示，保持总压为 0，选择 Specification Method 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter(m)为 0.3，单击 OK 按钮。

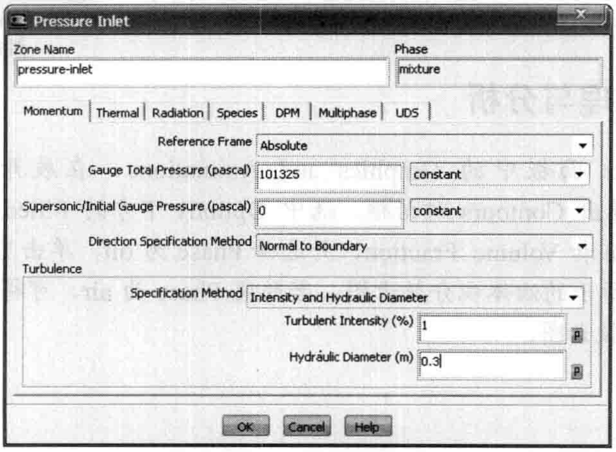


图6-123　Pressure Inlet 对话框

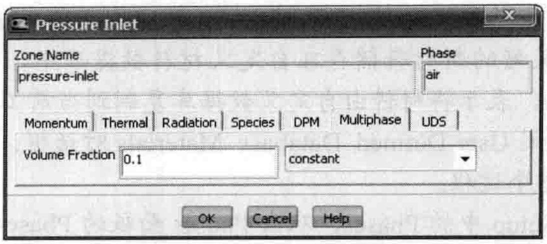


图6-124　入口空气的体积分数设置

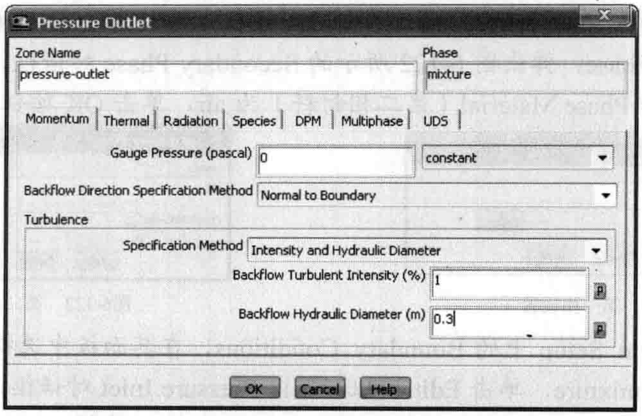


图6-125　Pressure Outlet 对话框

11. 单击 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。
12. 单击 Solution Solution Initialization，选择展开面板中的 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，完成初始化。
13. 初始化完后，单击 Run Calculation，在图 6-126 所示的面板中输入 Time Step Size (s)为 0.001，Number of Time Steps 为 1000，选择 Time Stepping Method 为 Fixed，并设置 Max Iterations/Time Step 为 30，单击 Calculate 按钮开始计算。

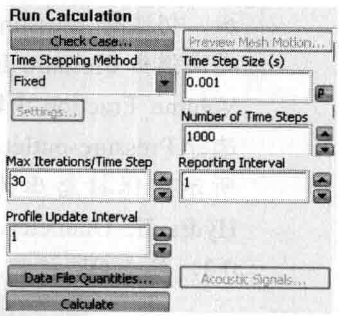


图6-126　计算参数设置

6.5.5 结果后处理与分析

1. 单击 Results 面板中的 Graphics and Animations，在展开的面板中双击 Contours，弹出 Contours 对话框，选中 Options 下方的 Filled，选择 Contours of 中的 Phase 和 Volume Fraction，并选择 Phase 为 oil，单击 Display 按钮，可得图 6-127 所示的油体积分数云图。若改变 Phase 为 air，可得图 6-128 所示的空气体积分数云图。

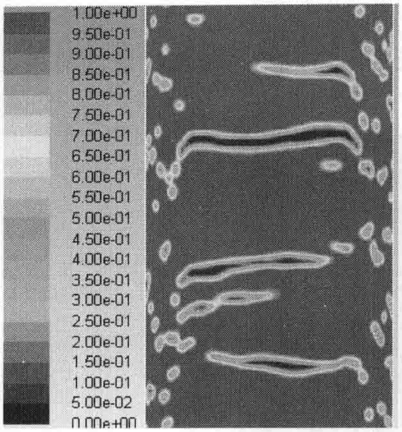


图6-127　油体积分数局部放大云图

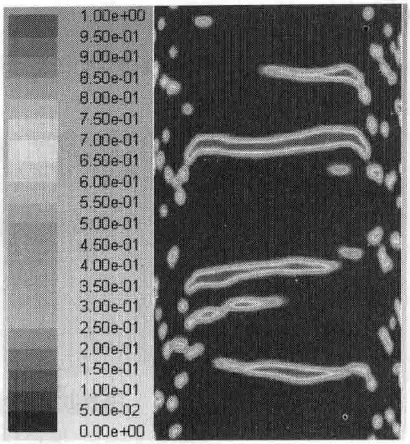


图6-128　空气体积分数局部放大云图

2. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（6-5.cas 和 6-5.dat）。
3. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

6.6 井口采油树油流流场模拟

井口采油树为油井最上部的控制和调节油生产的主要设备，主要由套管头、油管头、采油树本体三部分组成。当原油从油管到地面管线时，油流会在采油树的阀门处产生一些流动的盲区，形成漩涡，影响原油的正常采出过程。

6.6.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

这里我们就井口采油树油流流场进行模拟分析，具体尺寸如图 6-129 所示。管道内径为 62mm，模拟油管段度为 500mm，地面管线段长度为 500mm，盲通管段长度为 100mm，原油油流从下端入口进入，入口速度为 5m/s，出口处的压力为 50000Pa。定义原油密度为 867.5kg/m^3，黏度为 0.05Pa•s。

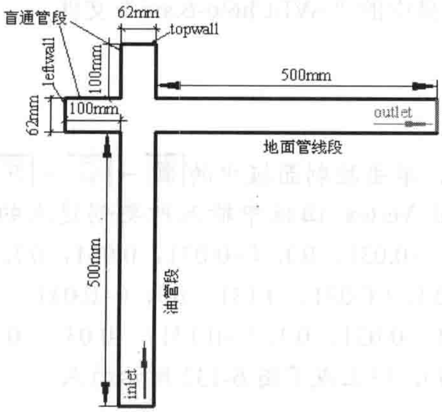


图6-129　建模尺寸

【思路分析】

本例涉及管道的进出口分别定义为速度入口和压力出口，整个模拟计算的流程如图 6-130 所示。



图6-130　井口采油树油流流场模拟流程图

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\6-6.msh、6-6.cas、6-6.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch6\6-6.avi”文件。

6.6.2 几何建模

1. 启动 Gambit 软件，单击控制面板中的 → → 按钮，如图 6-131 所示，在 Create Real Vertex 面板中输入所要创建点的坐标分别为（0.031，0.031，0）、（0.031，–0.031，0）、（–0.031，0.031，0）、（–0.031，–0.031，0）、（0.031，–0.531，0）、（0.031，0.131，0）、（–0.031，–0.531，0）、（–0.031，0.131，0）、（–0.131，0.031，0）、（–0.131，–0.031，0）、（0.531，0.031，0）、（0.531，–0.031，0），即生成了图 6-132 所示的点。

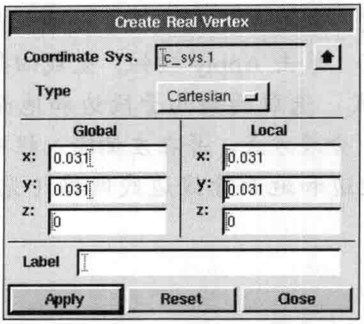


图6-131 Create Real Vertex 面板

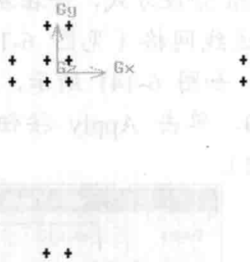


图6-132 建立好的几何点

2. 单击控制面板中的 → → 按钮，如图 6-133 所示，在 Create Straight Edge 面板中，每两点为一组，首尾顺次连接所创建的点，即生成了图 6-134 所示的边。

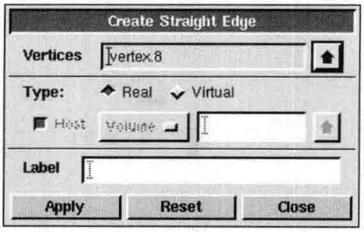


图6-133 Create Straight Edge 面板

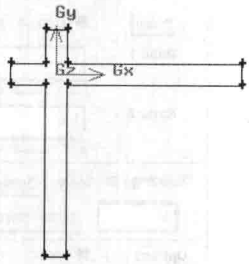


图6-134 建立好的边

3. 单击控制面板中的 → → 按钮，如图 6-135 所示，在 Create Face from Wireframe 面板中，选择全部建好的线，即生成了图 6-136 示的几何面。

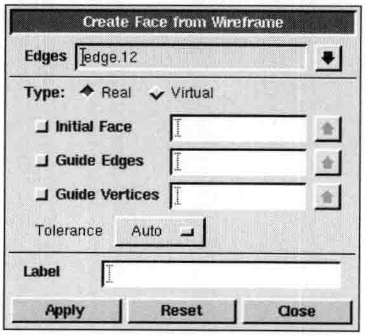


图6-135 Create Face from Wireframe 面板

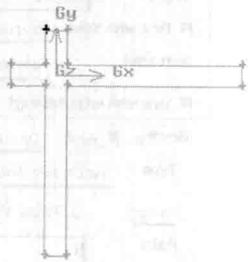


图6-136 建立好的几何面

6.6.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在图 6-137 所示的 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选取四条端面边（topwall、leftwall、inlet、outlet），按下 Double sided 前面的按钮使其呈红色选中显示，设置 Ratio1 和 Ratio2 的节点距离比例都为 1.1，选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 31，单击 Apply 按钮生成四条端面线段的线网格（见图 6-138）。再在 Mesh Edges 面板

的 Edges 黄色输入栏中选取四条盲通段边，如图 6-139 所示，选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 50，单击 Apply 按钮，生成四条盲通段边线网格（见图 6-140）。用同样的方式，选取两条油管段边和地面管线边，如图 6-141 所示，选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 250，单击 Apply 按钮，生成两条油管段边和地面管线边线网格（见图 6-142）。

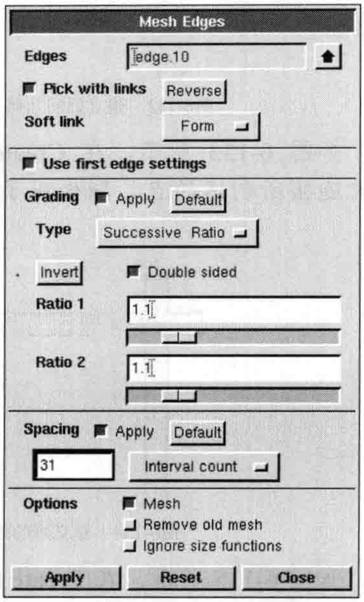


图6-137 Mesh Edges 面板

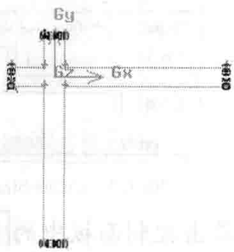


图6-138 划分好的线网格（部分）

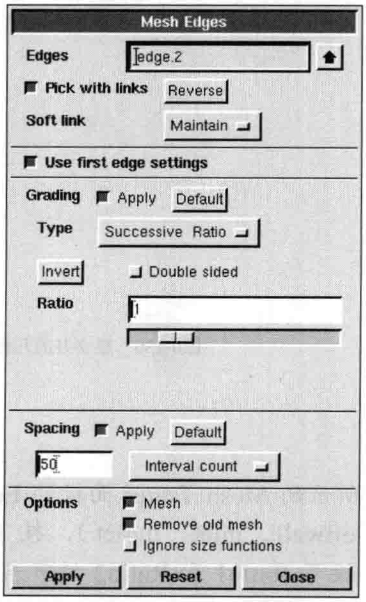


图6-139 Mesh Edges 面板

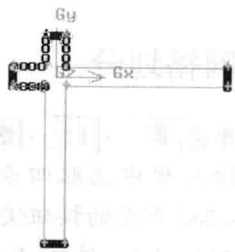


图6-140 划分好的线网格（部分）

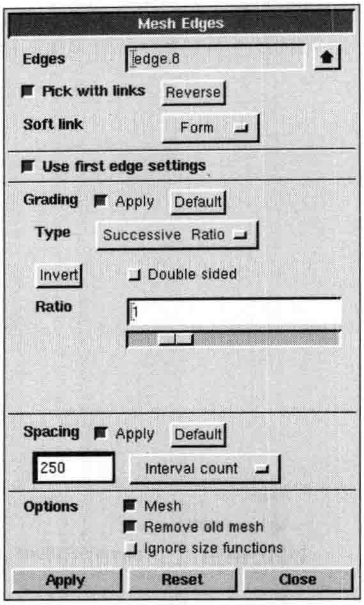


图6-141　Mesh Edges 面板

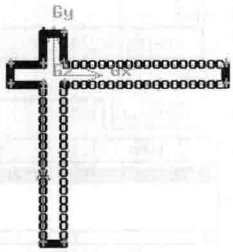


图6-142　划分好的线网格（部分）

2. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板（见图 6-143），用 Shift+鼠标左键选中已经完成线网格划分的几何面，运用 Quad 单元与 Map 方法对这些面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮，生成图 6-144 所示的网格。

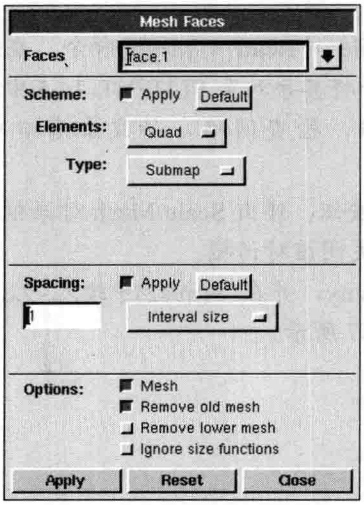


图6-143　Mesh Faces 面板



图6-144　生成的网格

3. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板（见图 6-145）中将上端面边命名为 topwall，边界类型定义为 wall；左端面边命名为 leftwall，边界类型定义为 wall；下端面边命名为 inlet，边界类型定义为 velocity-inlet；右端面边命名为 outlet，边界类型定义为 pressure-outlet，如图 6-146 所示。
4. 网格划分完后，选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 6-6.msh。

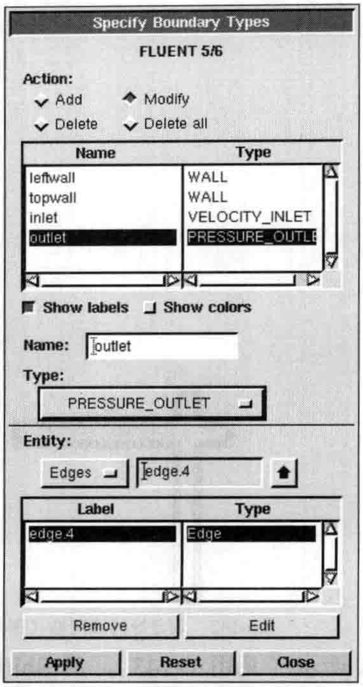


图6-145　Specify Boundary Types 面板

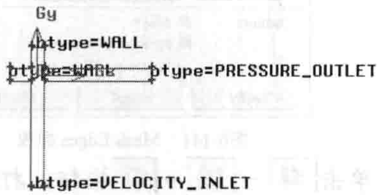


图6-146　边界类型定义

6.6.4 FLUENT 中的求解设置

1. 启动 FLUENT 14.5 2D 解算器。选择 File→ Read→ Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 6-6.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 14.5 中。单击 General 对话框 Mesh 中的 Check 按钮，检查网格，待文本窗口中出现“Done”，表示模型网格合适。
2. 单击 Problem Setup 的 General 中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。
3. 在 General 对话框的 Solver 下方选中 Gravity，并在 Y(m/s2)中输入–9.8，即考虑在 Y 轴负向存在重力加速度，如图 6-147 所示。

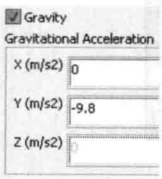


图6-147　设置重力加速度

4. 单击 Problem Setup 的 Models，双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 6-148 所示，选择 k-epsilon (2 eqn)，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。

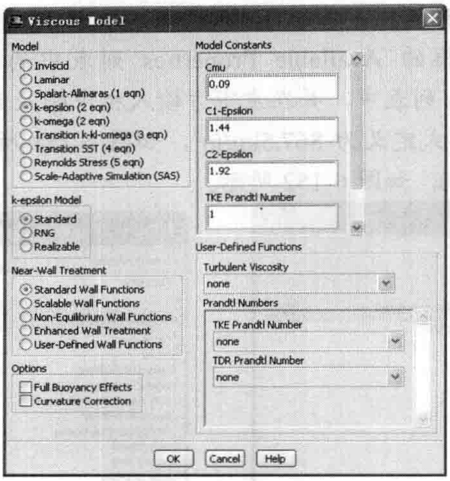


图6-148　Viscous Model 对话框

5. 下面定义本例的材料——油。选择 Define→Materials 命令，弹出 Materials 对话框。FLUENT 默认的材料为空气（air），由于本例原油为特殊材料，不属于 FLUENT 自带的材料数据库之列，故需要用户自定义材料。单击 Materials 对话框右侧的 User-Defined Database 按钮，此时会弹出 Open Database 对话框，若为第一次定义自定义材料数据库，需要用户输入数据库的名称，如本例输入的 new materials。名称输入完后，单击 OK 按钮，如图 6-149 所示。
6. 此时，弹出 User-Defined Database Materials 对话框，对话框中的 User-Defined Fluid Materials 列表为全空，表示尚未定义任何新材料。现在建立新材料数据库里的一个材料——crude oil，单击 User-Defined Database Materials 对话框最下方的 New 按钮，弹出 Material Properties 对话框，如图 6-150 所示。在 Material Properties 对话框的 Name 中输入油的名称 crude oil，保留 Formula 为空（若不知材料的分子式，可以保留为空），然后选择 Types 类型为 fluid，并在 Available Properties 列表中的密度（Density）、黏度（Viscosity）移到右侧 Material Properties 列表中。

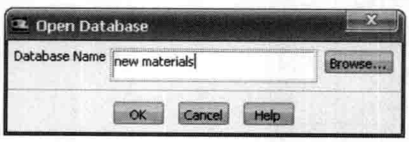


图6-149　Open Database 对话框

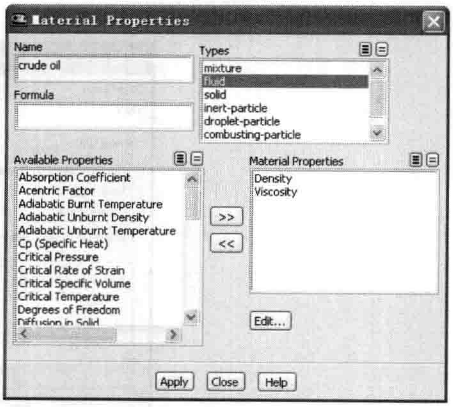


图6-150　Material Properties 对话框

7. 下面对密度和黏度进行定义。先选中 Material Properties 列表中的密度

（Density），单击对话框下侧的 Edit 按钮，弹出 Edit Property Methods 对话框。选择该对话框的 Available Properties 列表中的 constant，移入到右侧 Material Properties 列表中，并在左下方输入栏中输入 867.5，单击 OK 按钮，即将密度以常数形式定义为 867.5kg/m^3，如图 6-151 所示。按照同样的方式定义黏度（Viscosity），如图 6-152 所示。

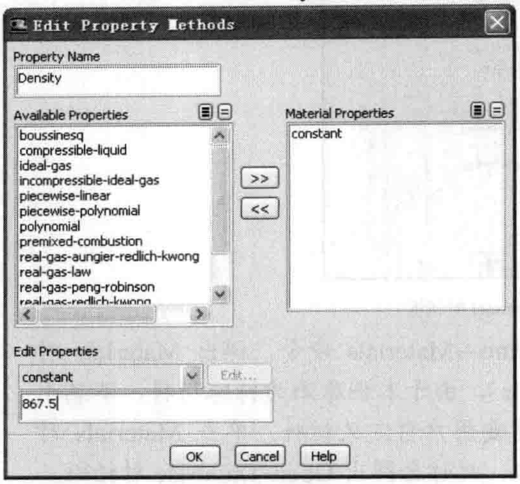


图6-151　密度定义

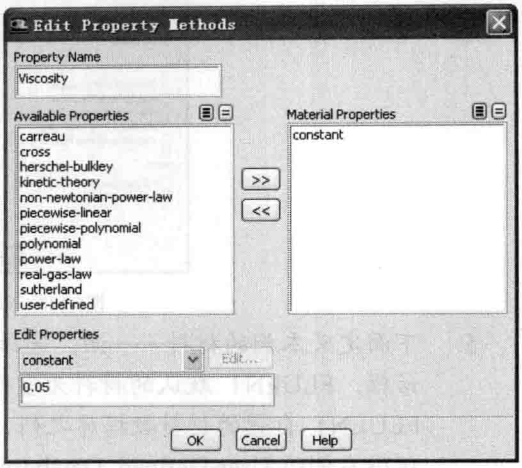


图6-152　黏度定义

8. 所有物性参数的数值定义完后，回到 Material Properties 对话框，单击 Apply 按钮和 Close 按钮。此时，User-Defined Database Materials 对话框中就已经有了新材料 crude oil 了。单击 User-Defined Database Materials 对话框下侧的 Save 按钮，表示将定义好的新材料存储在自定义材料数据库中，以便以后调用。然后，单击 Copy 按钮，表示将材料由自定义数据库复制到当前工程中。最后，单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。至此，我们完成了新材料定义的整个过程。
9. 单击 Problem Setup 的 Cell Zone Conditions，在 Zone 面板下选中 fluid，单击下方的 Edit 按钮，弹出图 6-153 所示的 Fluid 对话框，改变 Material Name 为 crude（即 crude oil）。

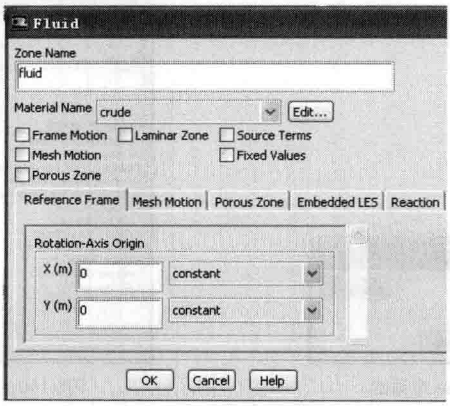


图6-153．Fluid 对话框

10. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 inlet，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 6-154 所示。在 Velocity Magnitude (m/s)中输入 5，选择 Specification Method 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity (%)为 1，Hydraulic Diameter (m)为 0.062，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 outlet，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，如图 6-155 所示。设置 Gauge Pressure 为 50000pascal，选择 Specification Method 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 1，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 0.062，单击 OK 按钮。

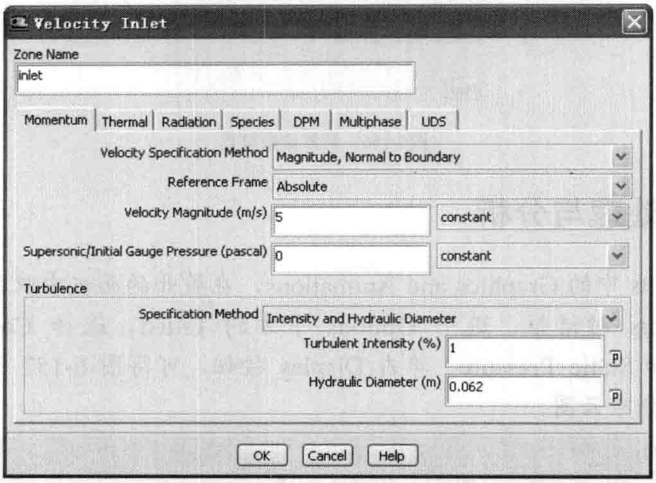


图6-154 Velocity Inlet 对话框

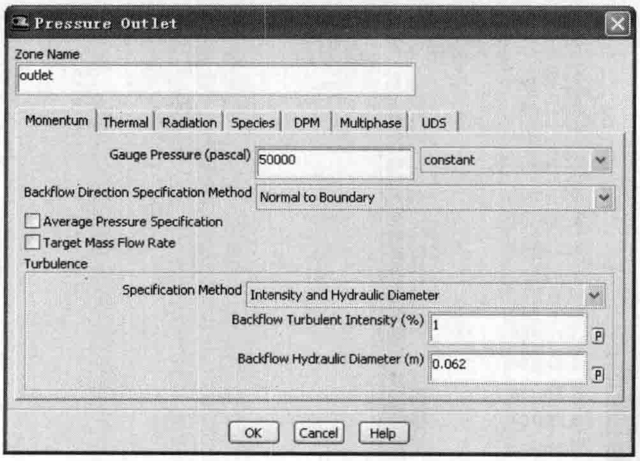


图6-155 Pressure Outlet 对话框

11. 单击 Solution 中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

12. 单击 Solution 中的 Solution Initialization，选择展开面板中的 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

13. 初始化完后，单击 Solution 中的 Run Calculation，在图 6-156 所示的面板中设置 Number of Ireration 为 2000，其他设置保持默认，单击 Calculate 按钮开始计算。

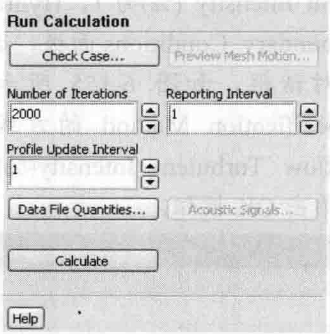


图6-156 计算参数设置

6.6.5 结果后处理与分析

1. 单击 Results 中的 Graphics and Animations，在展开的面板中双击 Contours，弹出 Contours 对话框，选中 Options 下方的 Filled，选择 Contours of 中的 Pressure 和 Static Pressure，单击 Display 按钮，可得图 6-157 所示的管道内部流场压力分布云图。

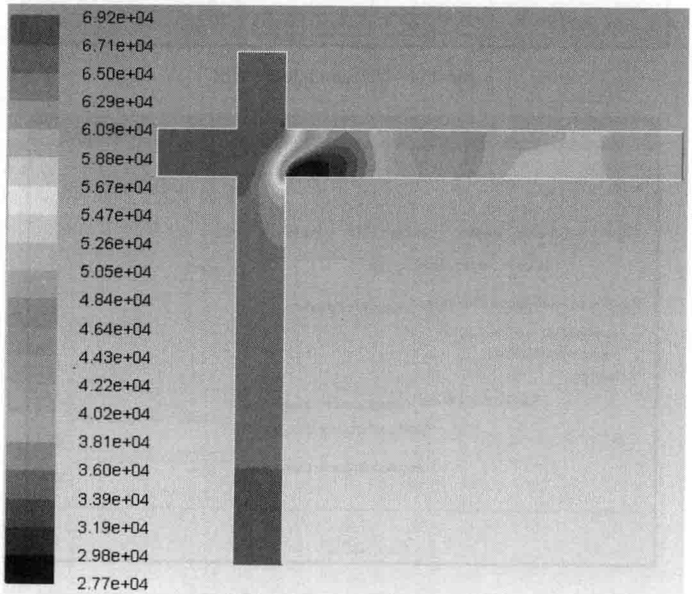


图6-157 压力分布云图

2. 在 Contours 对话框，选中 Options 下方的 Filled，选择 Contours of 中的 Velocity 和 Velocity Magnitude，单击 Display 按钮，可得图 6-158 所示的管道内部流场速度分布云图。

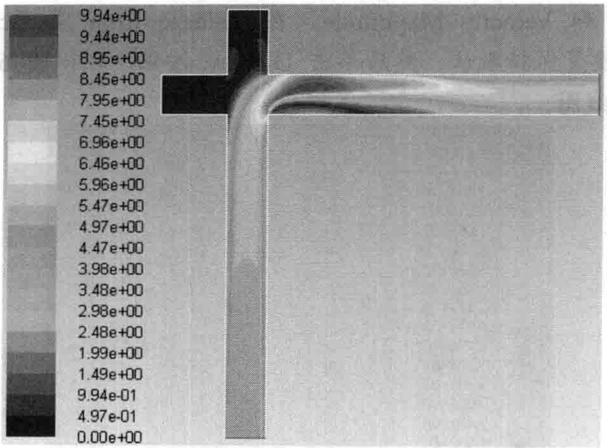


图6-158 速度分布云图

3. 在展开的 Graphics 面板中双击 Vectors，弹出 Vectors 对话框，设置 Skip 为 5，其他保持默认，选择 Vectors of 默认为 Velocity，Color by 设置为 Velocity 和 Velocity Magnitude，单击 Display 按钮，可得图 6-159 所示的管道内部流场速度矢量图。为了便于观察，将矢量图进行局部放大，如图 6-160 所示。

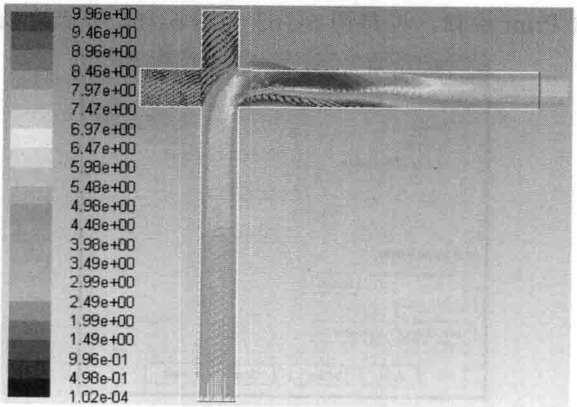


图6-159 速度矢量图

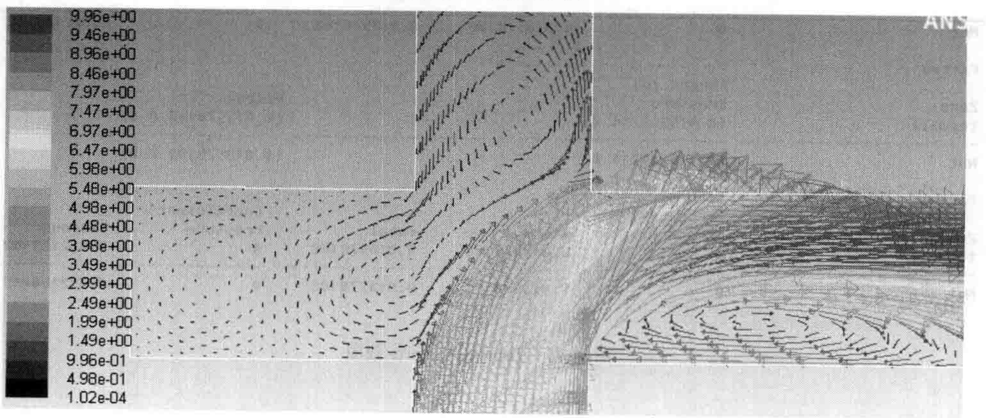


图6-160 速度矢量图（局部放大）

4. 在展开的 Graphics 面板中双击 Pathlines，弹出 Pathlines 对话框，设置 Color by

为 Velocity 和 Velocity Magnitude，在 Release from Surface 对话框中选择 inlet，其他设置保持默认。然后单击 Display 按钮，可得图 6-161 所示的管道内部流场流线图。

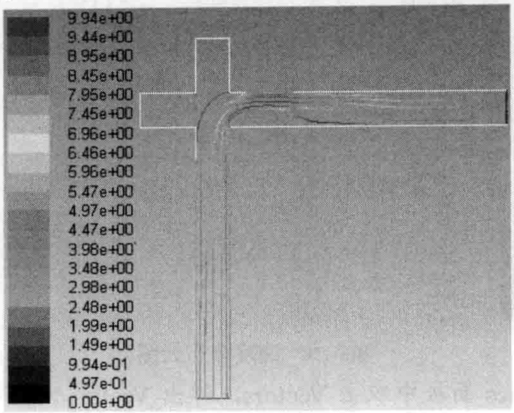


图6-161 流场流线图

5. 单击 Results 面板中的 Reports，在展开的 Reports 面板中双击 Forces，得到图 6-162 所示的 Force Reports 对话框。设置 Wall Zones 分别为 topwall 和 leftwall，单击 Print 按钮，可得图 6-163 和图 6-164 所示的报告。

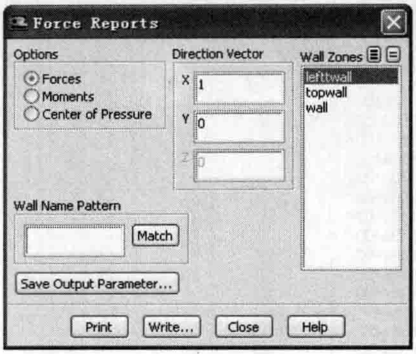


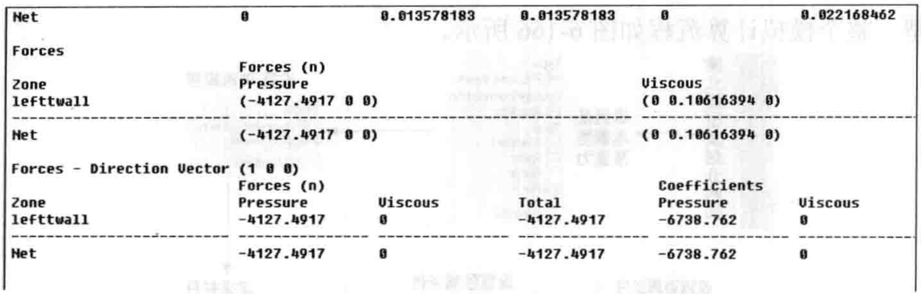
图6-162 Force Reports 对话框

```
Net                      0                0.013578183     0.013578183     0               0.022168462

Forces
                         Forces (n)
Zone                     Pressure                                         Viscous
topwall                  (0 4152.3716 0)                                  (0.013578183 0 0)
------------------------ -----------------------------------------------  ------------------------
Net                      (0 4152.3716 0)                                  (0.013578183 0 0)

Forces - Direction Vector (1 0 0)
                         Forces (n)                                       Coefficients
Zone                     Pressure         Viscous         Total           Pressure        Viscous
topwall                  0                0.013578183     0.013578183     0               0.022168462
------------------------ ---------------- --------------- --------------- --------------- ---------------
Net                      0                0.013578183     0.013578183     0               0.022168462
```

图6-163 Topwall Reports 截图


```
Net                         0                 0.013578183      0.013578183      0                0.022168462

Forces
                            Forces (n)
Zone                        Pressure                                            Viscous
lefttwall                   (-4127.4917 0 0)                                    (0 0.10616394 0)
------------------------------------------------------------------------------------------------------
Net                         (-4127.4917 0 0)                                    (0 0.10616394 0)

Forces - Direction Vector   (1 0 0)
                            Forces (n)                                          Coefficients
Zone                        Pressure          Viscous          Total            Pressure         Viscous
lefttwall                   -4127.4917        0                -4127.4917       -6738.762        0
------------------------------------------------------------------------------------------------------
Net                         -4127.4917        0                -4127.4917       -6738.762        0
```

图6-164 Leftwall Reports 截图

6. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（6-6.cas 和 6-6.dat）。
7. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

6.7 油管接头 J 形区涡流场模拟

6.7.1 案例简介与思路分析

随着油井开采深度的增加，管柱的工作条件日趋恶劣，油管泄漏、滑脱和断裂等事故时有发生。据统计，约有 64%的油管失效事故发生在油管接头处，接头的工作环境及井下工况是导致螺纹失效的主要因素。采用 FLUENT 模拟得到油管接头处流场，可以分析接头处涡流分布情况和流体运动轨迹，有助于分析流场诱导腐蚀。

【案例简介】

如图 6-165 所示，API 圆螺纹油管接头 J 形区的直径为 72.0mm，油管内径为 62.0mm，接头 J 形区的长度为 25.4mm。为了降低端面效应，两端长度均为 75.0mm。井筒流体从下往上流动，进口速度为 50m/s，出口压力为 7.5MPa。

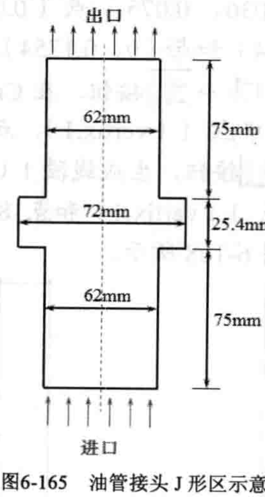


图6-165 油管接头 J 形区示意图

【思路分析】

本例考虑重力影响，由于油管接头进口速度较大，为湍流流动，因此选取 k-epsilon（2

eqn）模型。整个模拟计算流程如图 6-166 所示。

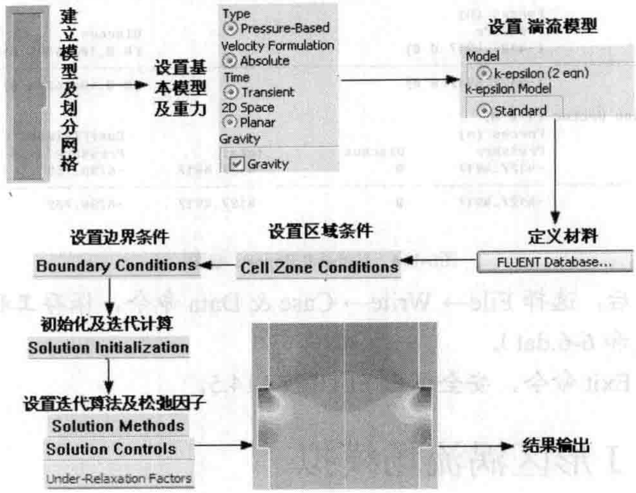


图6-166　油管接头 J 形区模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch6\6-7.msh、6-7.cas、6-7.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch6\6-7.avi”文件。

6.7.2　几何建模

1. 启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，在图 6-167 所示的 Create Real Vertex 面板的 x、y 坐标输入栏中输入（0，0），单击 Apply 按钮生成第一个点。随后按照同样的方法，依次建立点（0.031，0）、点（0.031，0.075）、点（0.036，0.075）点（0.036，0.1004）、点（0.031，0.1004）、点（0.031，0.1754）和点（0，0.1754）。
2. 下面连接线点。单击 → → 按钮，在 Creat Straight Edge 面板中按住 Shift 键同时按顺序依次选中点 1（vertix.1）、点 2（vertix.2）……直到点 8（vertix.8），单击 Apply 按钮，生成线段 1（edge.1）到线段 7（edge.7）。然后按照同样的方法连接点 1（vertix.1）和点 8（vertix.8），单击 Apply 按钮，共计 8 条线段，如图 6-168 所示。

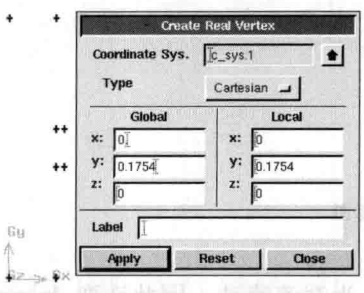


图6-167　Create Real Vertex 面板

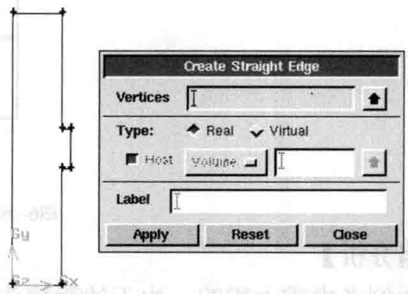


图6-168　Create Straight Edge 面板

3. 单击 → → 按钮，在 Create Face from Wireframe 面板中利用 Shift+鼠标左键框选所有的线段的 8 条边，如图 6-169 所示，然后单击 Apply 按钮创建面，如图 6-170 所示，完成几何模型的绘制。

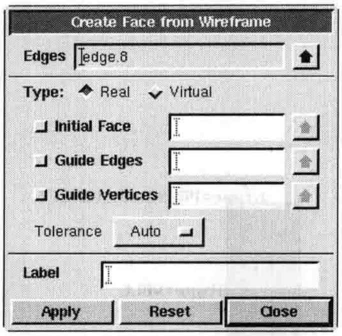


图6-169 Create Face from Wireframe 面板

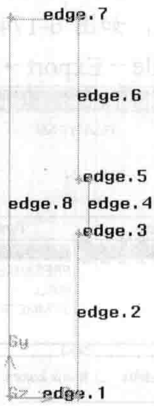
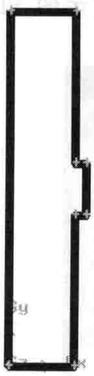
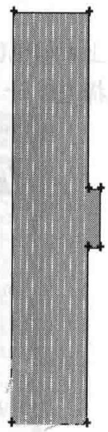


图6-170 绘制好的面

6.7.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在 Edges 输入框中选择线段 2（edge.2）和线段 2（edge.6），采用 Interval count 的划分方法将其划分为 75 段。利用同样的分段划分方式将线段 3 和线段 5 划分为 10 段，线段 4 划分为 25 段，线段 1 和线段 7 划分为 50 段，线段 8 划分为 175 段，为线段 2、线段 3 和线段 6 的节点数之和。绘制好的线网格如图 6-171 所示。
2. 单击 → → 按钮，选择所要划分的面网格，采用 Quad 和 Map 的划分方式，得到图 6-172 所示的面网格。


图6-171 线网格


图6-172 面网格

3. 网格划分好后，下面定义边界类型。单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板（见图 6-173）中选中下部进口边（edge.1），定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 inlet；选中上部出口边（edge.7），定义为压

力出口边界（PRESSURE_OUTLET），名称为 outlet；选择左侧边 8（edge.8），将其定义为对称边界（SYMMETRY），名称为 symmetry，将剩余的边（edge.2、edge.3、edge.4、edge.5、edge.6）也定义为 WALL 边界，名称为 wall，如图 6-174 所示。

4. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 6-7.msh。

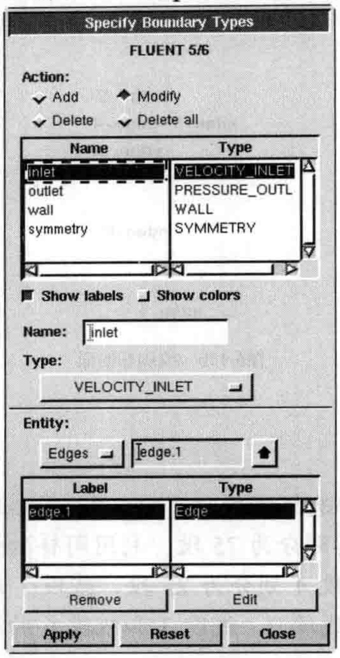


图6-173 Specify Boundary Types 面板

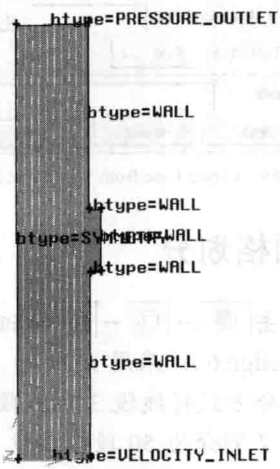


图6-174 边界类型定义

6.7.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的图 6-175 所示的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。

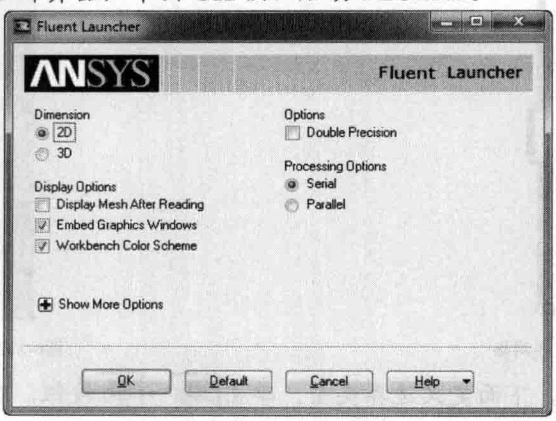


图6-175 Fluent Launcher 窗口

2. 选择 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件 6-7.msh。网格读入之

后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板（见图 6-176）中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。

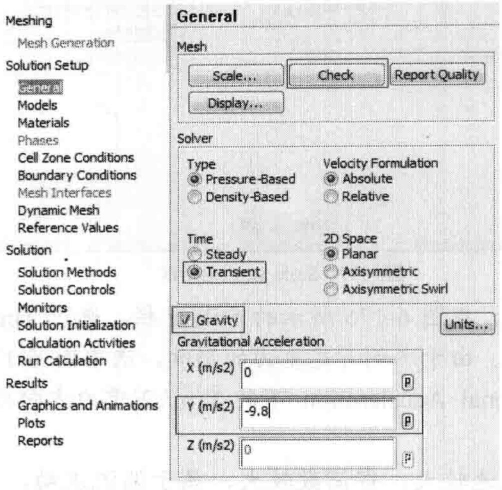


图6-176 General 面板

3. 此时视图窗口中没有网格的显示，为了显示网格，单击 General 控制面板中的 Display... 按钮，弹出图 6-177 所示的 Mesh Display 对话框。在 Mesh Display 对话框的 Surfaces 列表中选择 inlet、wall、outlet、symmetry、default-interior，在 Options 中选中 Edges，单击 Display... 按钮，在视图窗口中即可看到网格情况，如图 6-178 所示。

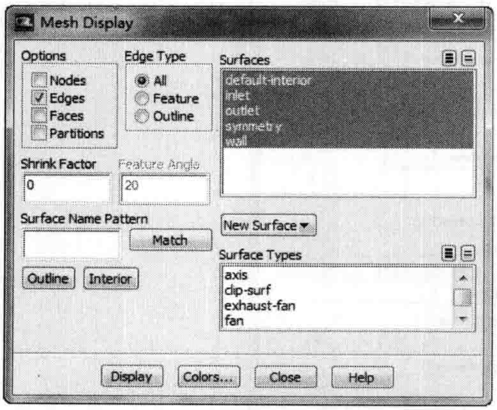


图6-177 Mesh Display 对话框

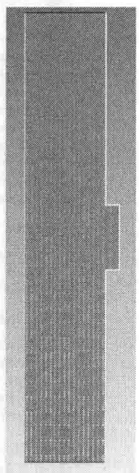


图6-178 显示网格

4. 单击 General 控制面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，从图 6-179 所示的对话框中可以看到计算区域的尺寸范围。

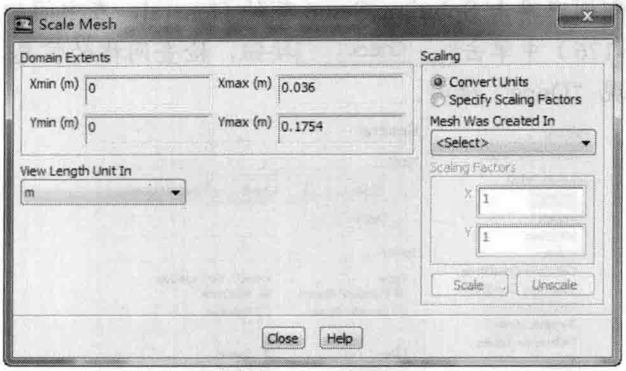


图6-179　Scale Mesh 对话框

5. 启动非定长模型，在图 6-176 所示的 Solver 栏，选中 Time 下方的 Unsteady，启用非定长计算。由于本例考虑重力的影响，选中图 6-176 中的 Gravity 复选框，在 Gravitational Acceleration 下的 Y(m/s2)重力方向栏中输入–9.8，即完成重力的加载。
6. 由于气井气体流速较大，雷诺数较大，属于湍流流动，这里需要设置湍流模型。在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 Models，在中间的 Models 控制面板中双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 6-180 所示。在该对话框中，选择 Model 下的 k-epsilon (2 eqn)，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，在 Near-Wall Treatment 中选择 Standard Wall Functions（标准壁面函数），单击 OK 按钮。

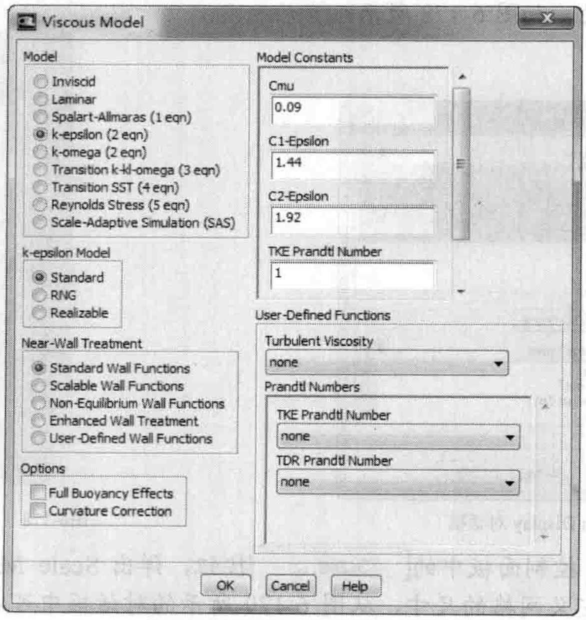


图6-180　Viscous Model 对话框

7. 在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 Materials，本例的流动介质为甲烷（methane），故单击 Materials 面板的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit

Materials 对话框。单击 Fluent Database 按钮，如图 6-181 所示，弹出 Fluent Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表中的 methane，单击 Copy 按钮，如图 6-182 所示。回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。

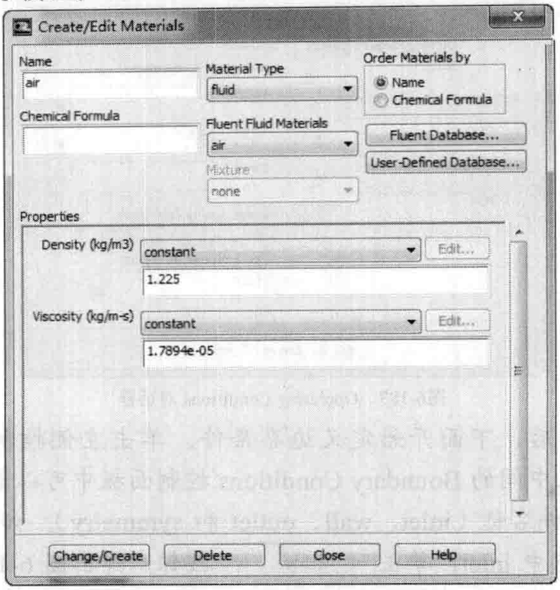


图6-181　Creat/Edit Materials 对话框

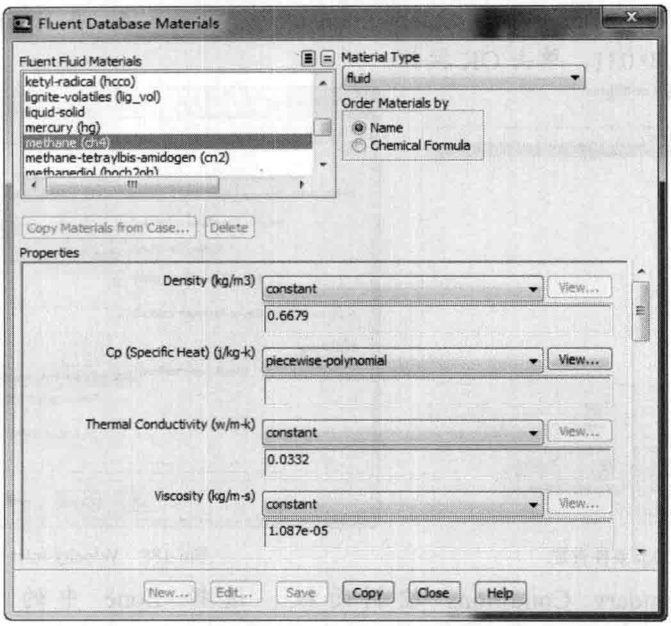


图6-182　Fluent Database Materials 对话框

8. 在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 Cell Zone Conditions，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，选择 Material Name 右侧列表中的 mathane，单击 OK 按钮。

9. 单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出 Operating Conditions 对话框（见图 6-183），选中 Specified Operating Density，并在 Operating Density 栏中输入 1.225，其他保持默认设置，单击 OK 按钮。

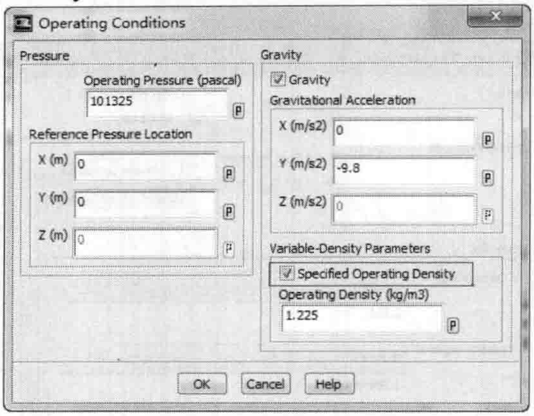


图6-183　Operating Conditions 对话框

10. 完成上述操作后，下面开始定义边界条件。单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在中间的 Boundary Conditions 控制面板中可以看到在 Gambit 中定义好的边界条件名称（inlet、wall、outlet 和 symmetry）。如图 6-184 所示，首先在 Zone 中选中 inlet，单击 Edit... 按钮，弹出图 6-185 所示的 Velocity Inlet 对话框。在其中选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity (%)中输入 5，在 Hydraulic Diameter (m)中输入 0.031，单击 OK 按钮。

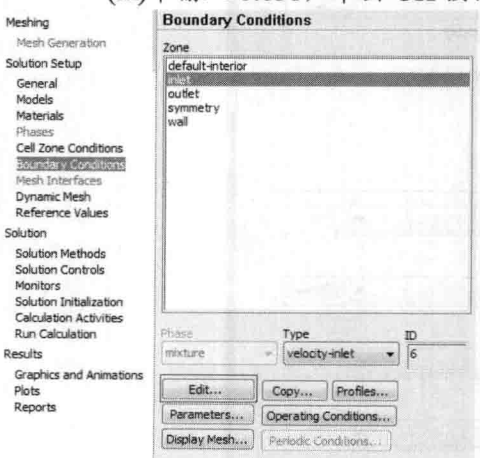


图6-184　边界条件设置

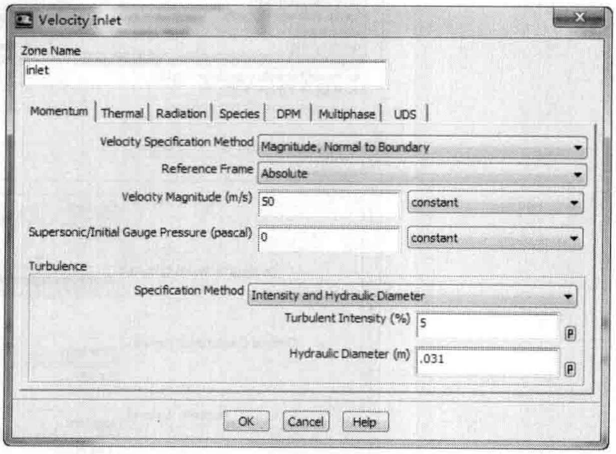


图6-185　Velocity Inlet 对话框

11. 回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 中的 outlet，单击 Edit... 按钮，在图 6-186 所示的 Pressure Outlet 对话框中的 Gauge Pressure(pascal)中输入 7500000，在其中选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Backflow Turbulent Intensity (%)中输入 10，在 Backflow Hydraulic Diameter (m)中输入 0.031，单击 OK 按钮。

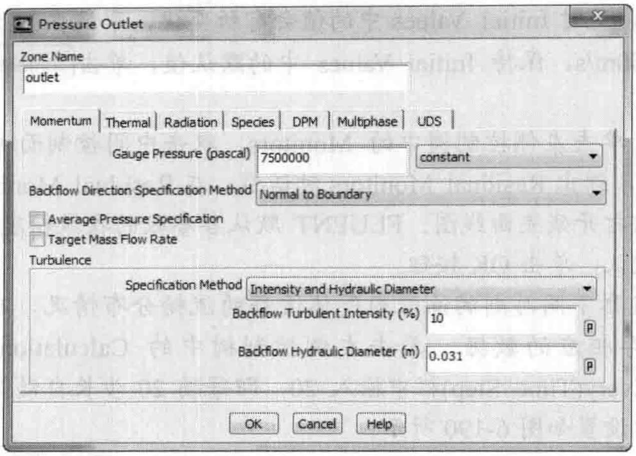


图6-186 Pressure Outlet 对话框

12. 回到 Boundary Conditions 控制面板，选择 Zone 中的 wall，单击 Edit... 按钮，弹出图 6-187 所示的 Wall 对话框，在对话框的 Wall Roughness 下方的 Roughness Height (m)中输入 0.0004678，保持 Roughness Constant 为 0.5，单击 OK 按钮。

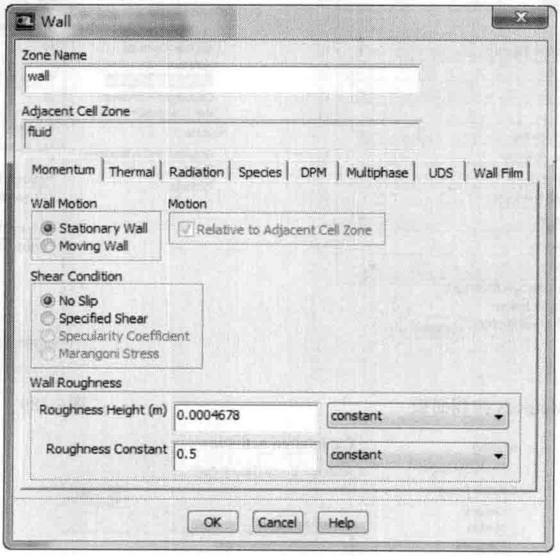


图6-187 Wall 对话框

13. 边界定义好后，在左侧控制树中单击 Solution Methods，中间区域即出现 Solution Methods 控制面板，如图 6-188 所示。用户可以在该面板中设置压力-速度耦合和求解方式，动量、体积分数、湍动能、湍动能耗散率等参数的差分形式等。这里选择 SIMPLEC 算法。
14. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，可以看到中间控制面板中各参数的松弛因子，这里不做改动，保持默认设置。
15. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 inlet，如图

6-189 所示，这时 Initial Values 中的值会有所变化，甲烷在 Y 方向的速度初始值被设为 50m/s，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮完成初始化。

16. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的 “Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。

17. 为了方便观察不同时刻的油管内气体运移的流畅分布情况，我们需要每隔一段时间保存相应的数据。单击左侧控制树中的 Calculation Activities，在 Autosave Every(Time Step)栏中输入 20，即每隔 20 步长自动保存相应的 Data 文件，具体设置如图 6-190 所示。

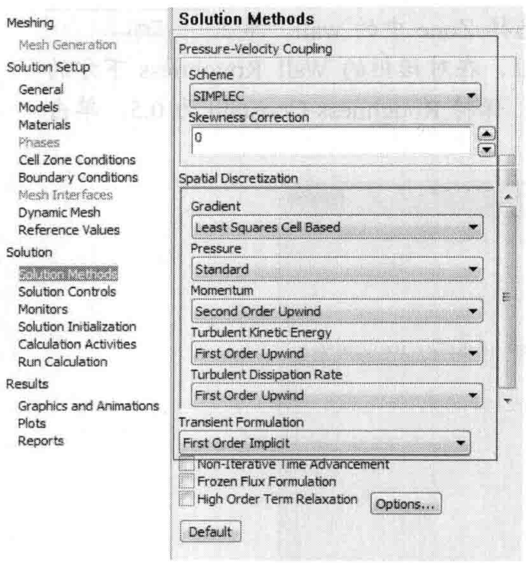


图6-188 Solution Methods 控制面板

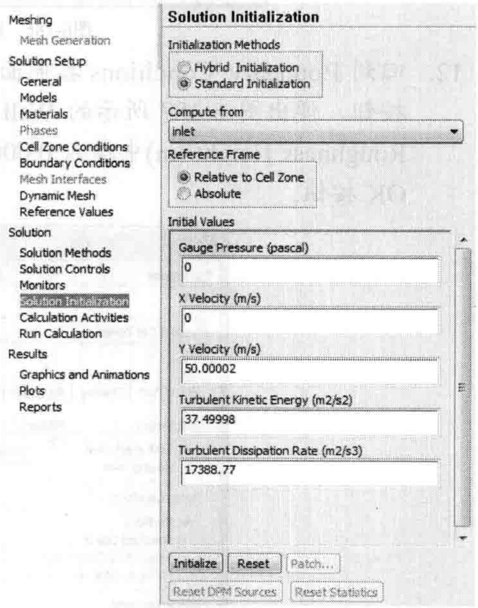


图6-189 初始化设置

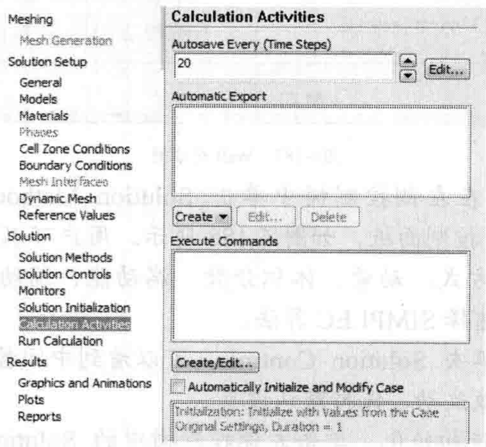


图6-190 自动保存设置

18. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 6-7.cas。

19. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在图 6-191 所示的面板中输入 Number of Time Steps 为 1000，设置 Time Step Size (s)为 0.001，Time Stepping Method 为 Fixed，并输入 Max Iterations/Time Step 为 30，单击 Calculate 按钮开始计算。

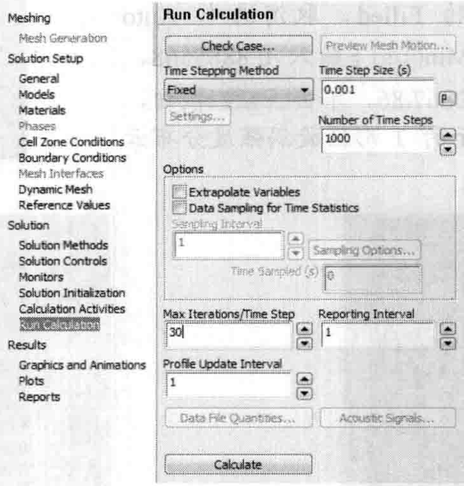


图6-191　计算步数

6.7.5　结果后处理与分析

1. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中（见图 6-192）双击 Contours，弹出图 6-193 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity 和 Velocity Magnitude，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 6-194 所示的速度分布云图。

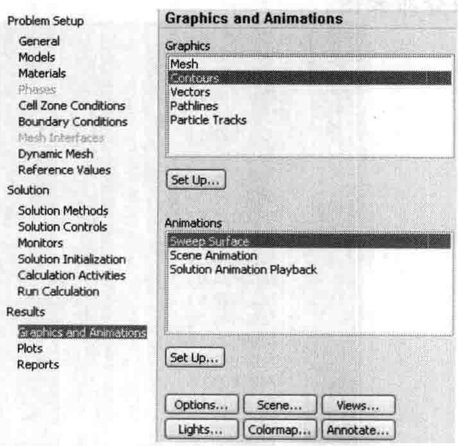


图6-192　Graphics and Animations 控制面板

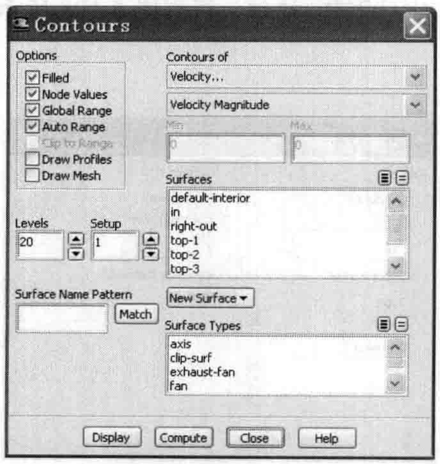


图6-193　Contours 对话框

2. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity 和 Vorticity Magnitude，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 6-195 所示的旋涡强度分布云图。
3. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity 和 Vorticity Magnitude，选中 Options 下方的 Filled，取消选中 Auto Range 选项，在 Min(1/s)下输入 0.8885568，Max(1/s)下输入 20867.86，单击 Display 按钮，得到图 6-196 所示的 J 形区旋涡强度分布云图。

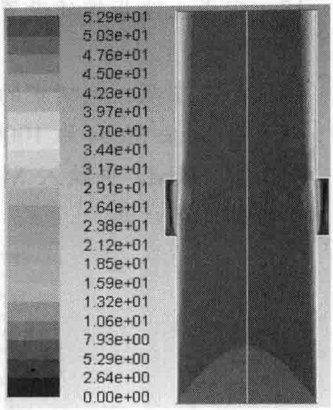


图6-194 速度分布云图

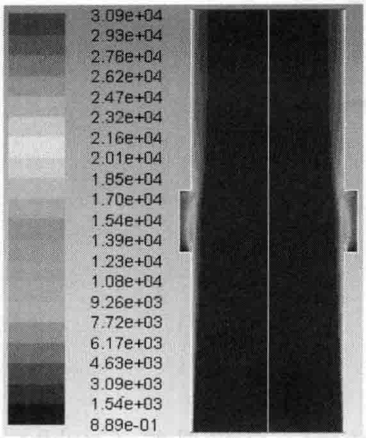


图6-195 旋涡强度分布云图

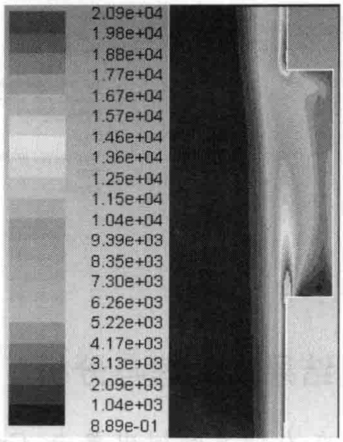


图6-196 J 形区旋涡强度分布云图

4. 选择 Display→ Colormap 命令，打开 Colormap 对话框（见图 6-197），选择 Type 类型为 float，单击 Apply 按钮。然后在 Contours 对话框中选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure 和 Static Pressure，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 6-198 所示的压强分布云图。

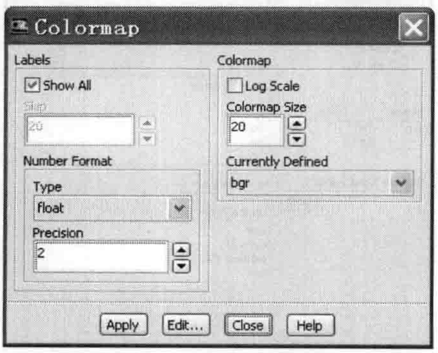


图6-197 Colormap 对话框

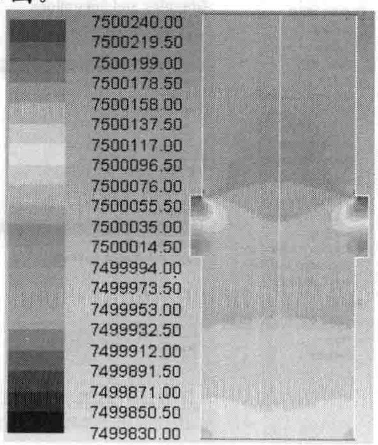


图6-198 压强分布云图

5. 单击 Vectors，在 Vectors 对话框中，选择 Vectors of 下方的选项 Velocity、Velocity 和 Velocity Magnitude，单击 Display 按钮，得到图 6-199 所示的 J 形区速度矢量图。
6. 在 Vectors 对话框中，改变 Vectors of 下方的选项 Velocity Magnitude 为 Vorticity Magnitude，单击 Display 按钮，得到图 6-200 所示的 J 形区旋涡强度矢量图。

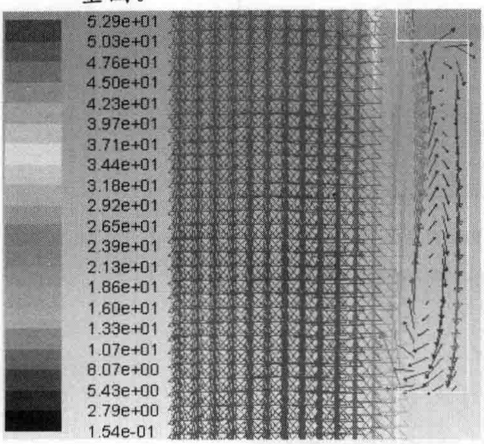


图6-199　J 形区速度矢量图

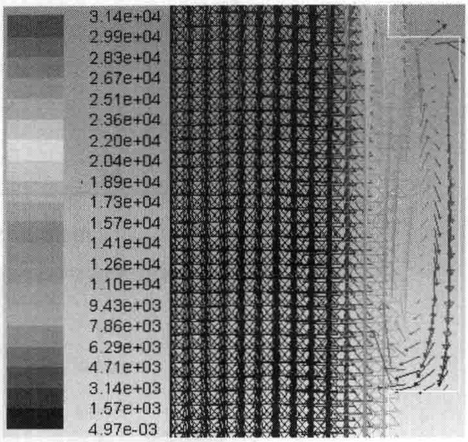


图6-200　J 形区旋涡强度矢量图

7. 单击 Pathlines，选择 Releaes from Surfaces 下的 inlet，其他选项保持默认，单击 Display 按钮，得到图 6-201 所示的进口迹线图。
8. 在左侧控制树下单击 Plots，打开 Plots 控制面板（见图 6-202），选择 XY Plot，双击打开 Solution XY Plot 对话框（见图 6-203），设置 Plot Direction 下的 X 为 0，Y 为 1，选择 Y Axis Function 下的 Velocity 和 Velocity Magnitude，选择 X Axis Function 下的 Direction Vector，选择 Surfaces 下的 symmetry，单击 Plot 按钮，得到图 6-204 所示的轴线处速度分布图。

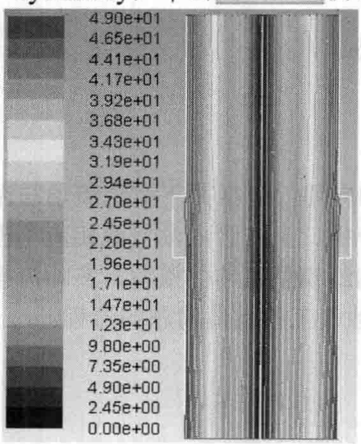


图6-201　进口迹线图

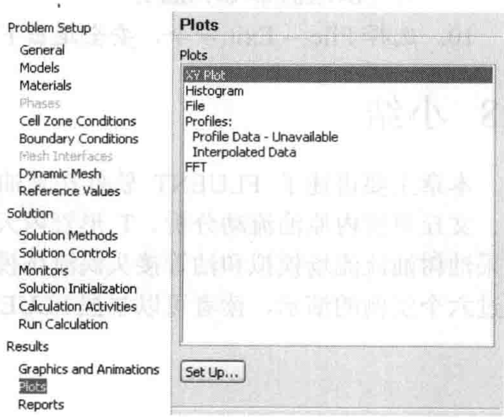


图6-202　Plots 控制面板

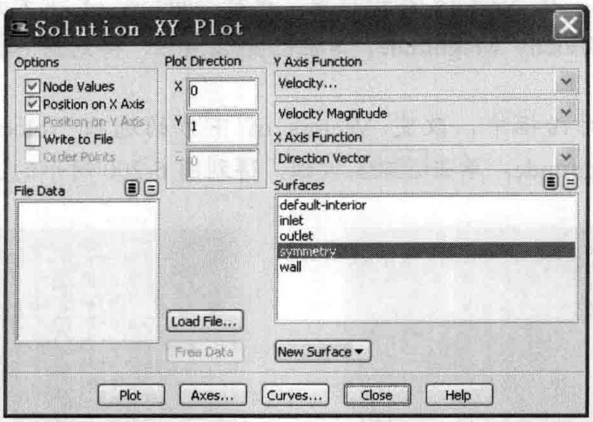


图6-203　Solution XY Plot 对话框

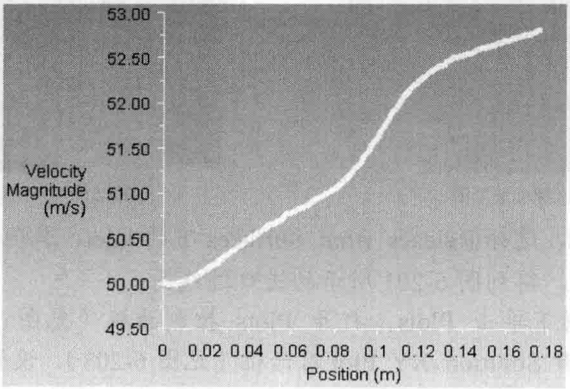


图6-204　轴线处的速度分布图

9. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（6-7.cas 和 6-7.dat）。
10. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

6.8 小结

本章主要讲述了 FLUENT 软件在采油气工程中的应用，包括井下节流流场与温度场模拟、文丘里管内原油流动分析、T 形管内天然气流动分析、上升管内油气两相流动模拟、井口采油树油流流场模拟和油管接头涡流场模拟，涉及湍流模型、传热模型、多相流模型等。通过六个实例的演示，读者可以掌握 FLUENT 模拟采油气工程具体问题的流程。

第7章 油气田地面工程中的应用

油气田地面工程是连接石油天然气能源生产与供应上下游的重要的中间环节，包括油气矿场集输、油气加工处理、油气管道输送等环节。油气在管道中的输运、输气管道的泄漏扩散、热油管道的温降、油气水多相流的分离等，都属于油气田地面工程中的流体问题。认清它们的规律，有助于保证管道的正常运作，并帮助我们在发生管道泄漏等突发情况下采取正确的应急措施。同时也有助于帮助我们了解多相流动的规律，以及分离器内油气水分离的规律。本章将对 FLUENT 在油气田地面工程中的应用进行介绍，通过八个典型实例详细介绍油气田地面工程中所涉及的流体问题的数值处理方法及过程。

本章内容

- 油气田地面工程中涉及的 CFD 问题。
- 油水两相在突变管和弯管内的流动模拟。
- 油品在节流阀内的流动模拟。
- 输气管道泄漏扩散模拟。
- 热油管道温降模拟。
- 卧式油气水三相分离数值模拟。
- 液固两相流冲刷腐蚀模拟。
- 甲烷燃烧器模拟。

本章案例

- 实例 1：突变管内油水两相流动分析。
- 实例 2：弯管内油水两相流动分析。
- 实例 3：节流阀内油品流动分析。
- 实例 4：输气管道泄漏扩散分析。
- 实例 5：热油管道温降分析。
- 实例 6：油水分离器仿真模拟。
- 实例 7：液固两相流冲刷腐蚀模拟。
- 实例 8：甲烷燃烧器模拟。

7.1 概述

油气田地面工程是连接石油天然气能源生产与供应上下游的重要的中间环节，包括从油气井到油气集输站的集输，石油与天然气的加工与净化，石油与天然气的长距离管道输送，成品油的管道输送以及天然气和油品的供应与销售等一系列环节。

绝大多数的石油和天然气都是通过管道来运输的。为了满足地形和输量的需要，管道中常安有弯管（图 7-1）、阀门（图 7-2）、突变管等构件，石油与天然气流经这些管件时，流场发生剧烈的变化。如当天然气流经节流阀时，速度急剧增大，而温度、压力急剧降低，温度的降低和压力的改变将导致阀门处的天然气与游离水生成天然气水合物，从而造成管路的堵塞问题；再如油品（尤其是轻质油品）流经节流阀时，由于压能转化为动能，压力急剧下降，可能低于油品的饱和蒸汽压，而出现空化现象，加剧管道的腐蚀。通过 FLUENT 来研究原油和天然气在不同管件中的流场分布，对管道及管道附件的设计、管道系统的安全正常运行、减少腐蚀等有重要意义。

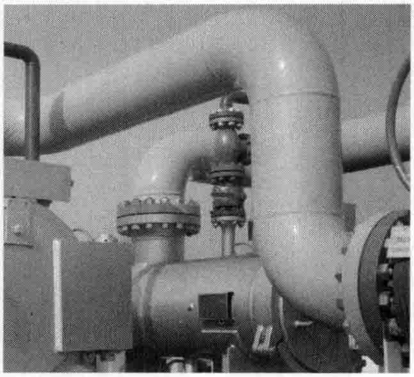


图7-1　弯管

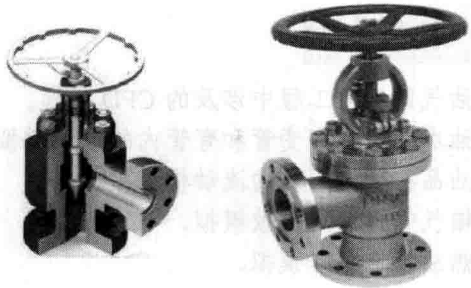


图7-2　节流阀

油田进入中后期开发后，生产液的含水量不断升高，尤其是当油井见水后，油井所产的原油含水量将会急剧升高。另一方面，当原油黏度较高时，为了降低输送能耗，在原油集输时会采取掺水输送工艺。因此，油水两相流动广泛存在于石油生产和原油集输过程中。当油水两相流经弯管、突变管或是阀门时，管内流体的压力、速度有明显变化，且变化程度受到油水含量的影响。通过 FLUENT 的多相流模型模拟油水两相流在不同管件中的流动规律，可为油水两相流输送管道的生产运行提供必要的参考。

由于管道的腐蚀、操作压力的变化以及管道施工质量（如焊接问题）等，可能会导致输气管道的泄漏，一旦天然气泄漏到空气中，当空气中甲烷体积分数为 5%～15%时，遇到明火就会发生爆炸，如图 7-3 所示；若天然气含硫，当空气中硫化氢体积分数达到 700μL/L 时，人很快会失去知觉，停止呼吸，如果不及时采取抢救措施，即会导致中毒死亡。可见，天然气管道的泄漏不仅会导致巨大的经济损失，还会引起火灾、爆炸、中毒、伤亡等恶性事故，严重威胁人们的生命和财产安全。通过 FLUENT 软件对天然气管道泄漏情况进行模拟，可为发生泄漏时采取正确的应对措施提供参考。



图7-3　天然气管道泄漏引起火灾图

稠油以及含蜡原油在长距离输送时，由于它们的凝点较高，为了防止原油凝结导致油管堵塞，往往采取加热输送的方式。在热油管道运行过程中，不可避免地会因计划性或事故性的原因而发生停输。原油管道的停输再启动一直是管道安全运行的核心技术问题。由于热油管道大部分都采用埋地敷设，如图 7-4 所示，因此在实际生产、运行中，对于停输后热油管道以及土壤温度场分布的研究，具有重要的意义和作用。

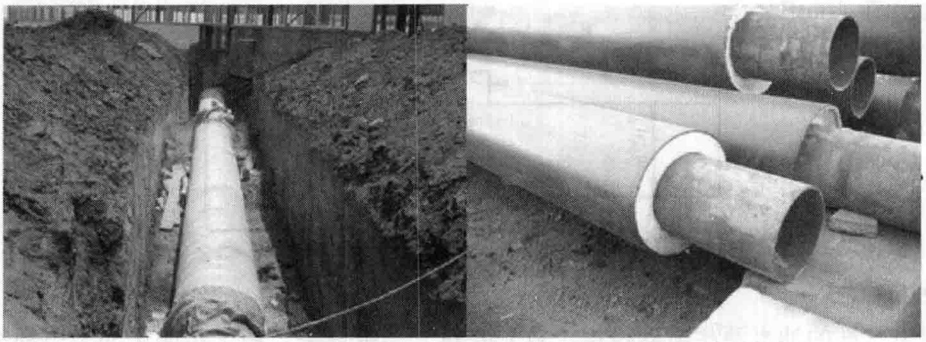


图7-4　埋地管道（左）及管道保温层（右）

对于凝析油气田或伴生气油田，当油气水通过集输管网输送到油气处理站时，首先要进行油气水的分离。其中，陆地上处理厂最常用的进站分离设备便是卧式油气水三相分离器，如图 7-5 所示。相比于立式分离器，其单位体积的处理量大；相比于旋流分离器，其工况适应性强。通过 FLUENT 的多相流模型，对分离器内的场进行分析，可以预测分离器在不同工况下的分离效果，也可以为分离器内部构件的改造提供必要的参考。

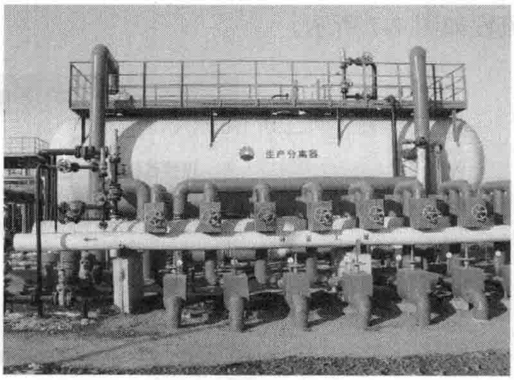


图7-5　三相分离器

可见，油气田地面工程中涉及的流体流动问题复杂多样，既有管道中油气单相流动以及油气水和固体颗粒的多相流动，又面临流固耦合振动、冲蚀等问题。利用 FLUENT 软件开展相关的数值模拟，可以为工程实践提供有价值的参考。下面就油气田地面工程中出现的几个典型问题进行分析，帮助读者掌握利用 FLUENT 解决油气田地面工程中的流体问题。

7.2 突变管内油水两相流动分析

在实际工程的管道输送中，经常会遇到突扩或突缩的情况，当流体经过这样的突然扩张或突然收缩的管道时，流动将与管壁发生分离，并形成旋涡，从而造成了压强的损失，消耗了管输的能量。在油田开发的中后期，为了提高采收率，注水是一种常用的增产方法。随着生产液中含水量的上升，地面上的出油管道均会产生油水两相流动，其广泛存在于石油生产中。研究油水两相流在集输管道中的流动规律对于减少能耗、制定防腐措施具有积极意义。

7.2.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 7-6 所示，选取某输油管道工程两段管径分别为 500mm 和 1000mm 的管道构成的突变管进行分析，管段总长度为 6m，两端各 3m。设置油（oil）的密度为 838kg/m^3，黏度为 0.01426kg/(m·s)。油水两相混合物从左方入口进入，混合流体进口流速为 1.5m/s，出口设置为自由出流（outflow）。

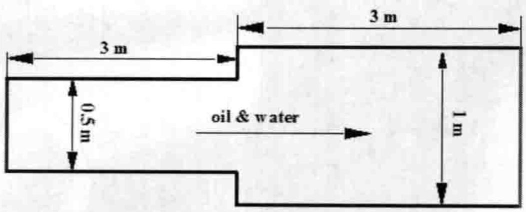


图7-6 突变管模型示意图

【思路分析】

本例为二维的油水两相流动模拟，首先要建立二维模型。由于是简单的二维环空柱体模型，这里选用 Gambit 软件进行建模与网格划分，然后在 FLUENT 中调用多相流模型，具体流程如图 7-7 所示。

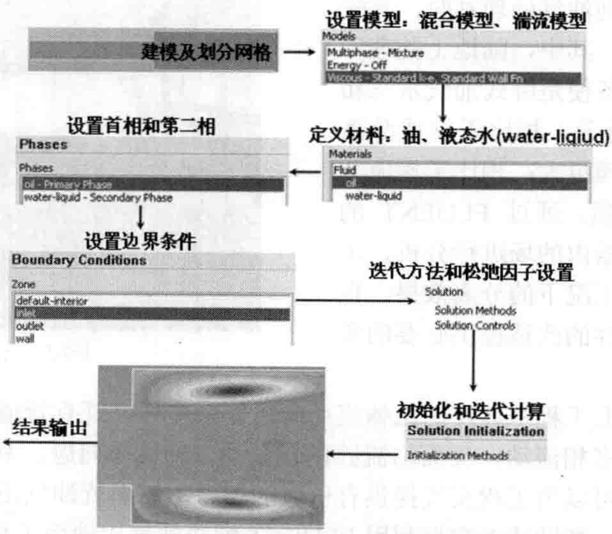


图7-7 突变管内油水两相流模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\7-2.msh、7-2.cas、7-2.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch7\7-2.avi”文件。

7.2.2 几何建模

1. 启动 Gambit 软件，单击控制面板中的 → → 按钮，如图 7-8 所示，在 Create Real Vertex 面板中建立所要创建的点，坐标分别为（0，0.25，0）、（0，–0.25，0）、（3，0.25，0）、（3，–0.25，0）、（3，0.5，0）、（3，–0.5，0）、（6，0.5，0）、（6，–0.5，0）。
2. 单击 → → 按钮，如图 7-9 所示，在 Create Straight Edge 面板中，每两点为一组，首尾顺次连接所创建的 8 个点，即生成了图 7-10 所示的几何模型。

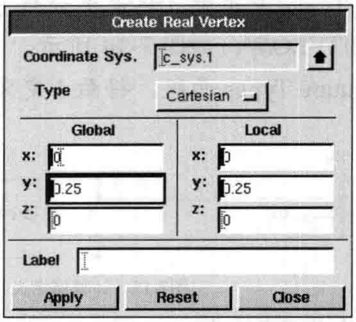


图7-8 Create Real Vertex 面板

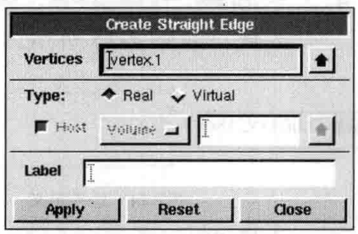


图7-9 Create Straight Edge 面板

3. 单击控制面板中的 → → 按钮，如图 7-11 所示，在 Create Face from Wireframe 面板中，选择全部建好的线，单击 Apply 按钮，生成几何面域。

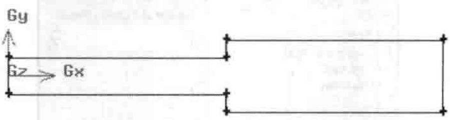


图7-10 生成边

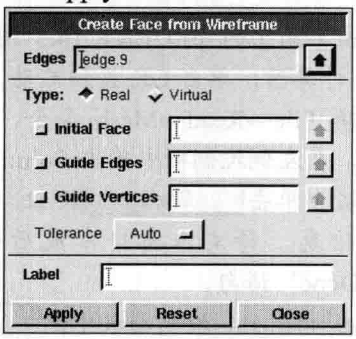


图7-11 Create Face from Wireframe 面板

7.2.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在图 7-12 所示的 Mesh Faces 面板的 Faces 黄色输入栏中选取面 1（face.1），选择 Interval size 分段方式，并在左侧输入栏中输入 0.01，单击 Apply 按钮，得出的面网格如图 7-13 所示。

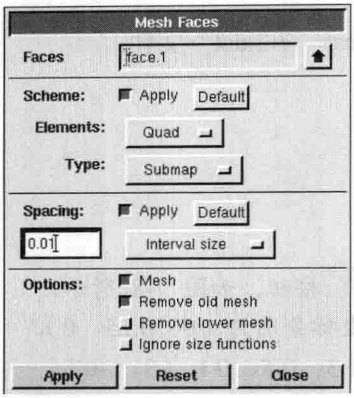


图7-12 Mesh Faces 面板

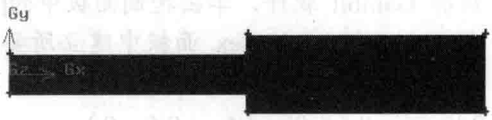


图7-13 面网格

2. 单击视图控制面板中的按钮，在弹出的 Specify Display Attributes 面板中，将下方 Mesh 后面的 Off 选中，关闭视图窗口中的网格显示。
3. 单击→按钮，在 Specify Boundary Types 面板中，将水平方向上前后两条边分别定义为 VELOCITY_INLET 和 OUTFLOW，如图 7-14 所示。
4. 单击→按钮，弹出 Specify Continuum Types 面板，将面 1 定义为流体区域，如图 7-15 所示。

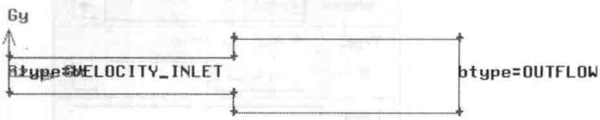


图7-14 边界定义

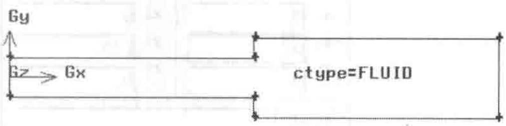


图7-15 计算域定义

5. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 7-2.msh。

7.2.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件 7-2.msh。网格读入之后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。
3. 单击 General 控制面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，可以看到计算区域的尺寸范围。
4. 下面定义本例所用到的模型。首先单击左侧控制树中的 Models，在中间的 Models 对话框中双击 Multiphase-Off，弹出 Multiphase Model 对话框，如图 7-16

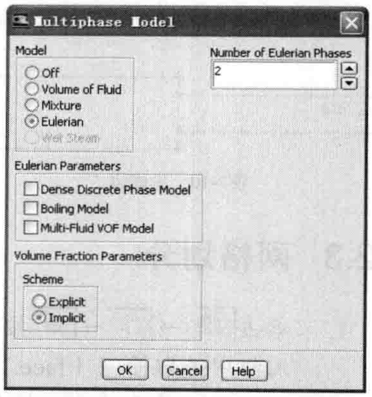


图7-16 Multiphase Model 对话框

所示。在 Multiphase Model 对话框中，选择 Model 下的 Eulerian，并设置右侧 Number of Eulerian Phases 为 2，其他保持默认设置，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

5. 由于流动属于湍流，这里需要设置湍流模型。在中间的 Models 控制面板中双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 7-17 所示。在该对话框中，选择 Model 下的 k-epsilon (2 eqn)，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，在 Near-Wall Treatment 中选择 Standard Wall Functions（标准壁面函数），模型参数保持默认设置，单击 OK 按钮。
6. 单击左侧控制树中的 Materials，在中间的 Materials 控制面板中单击 Create/Edit... 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。单击 Fluent Database... 按钮，在 Fluent Database Materials 对话框的 Fluent Fluid Materials 中选中 Water-liquid (h2o<l>)，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中来。
7. 接着定义油。单击 Create/Edit Materials 对话框右侧的 User-Defined Database... 按钮，弹出图 7-18 所示的 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入“new materials”，然后单击 Browse... 按钮，弹出图 7-19 所示的 User-Defined Database Materials 对话框。在 User-Defined Database Materials 操作面板中定义类型为 fluid，名称为 oil，物性参数如图 7-19 所示，单击 Save 和 Copy 按钮，将定义好的油保存在自定义材料数据库中，并导入到当前工程中进行计算。完后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。回到 Materials 控制面板中，即会发现在 Materials 的 Fluid 下拉列表中存在了水和油两种材料。

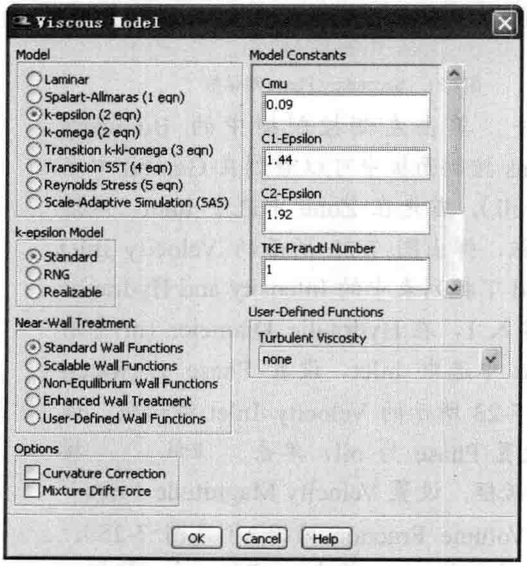


图7-17　Viscous Model 对话框

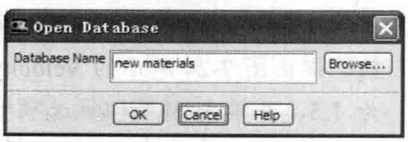


图7-18　Open Database 对话框

8. 下步定义基本相和第二相。单击左侧控制树中的 Phases，在中间的 Phases 控制面板中，可以看到 Primary-phase 和 Secondary-phase 两项。首先双击

Primary-phase，弹出 Primary Phase 对话框，如图 7-20 所示。在其 Phase Material 下拉列表中选择 water-liquid，并修改 Name 为 water-liquid，单击 OK 按钮。然后回到 Phases 控制面板中，双击 Secondary-phase，弹出图 7-21 所示的 Secondary Phase 对话框。在 Phase Material 下拉列表中选择 oil，并在 Name 文本框中输入 oil 代替原来的 phase-2，单击 OK 按钮。

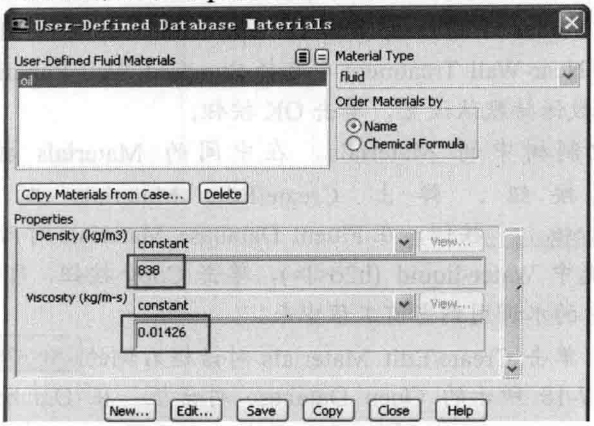


图7-19　User-Defined Database Materials 对话框

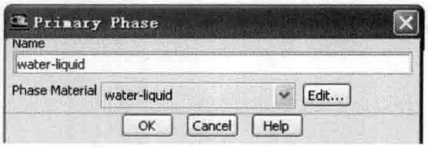


图7-20　Primary Phase 对话框

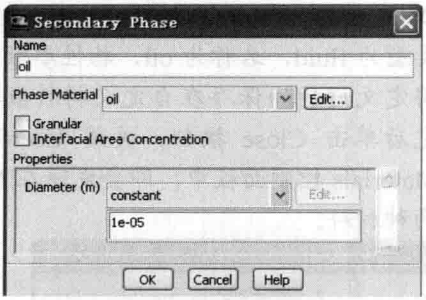


图7-21　Secondary Phase 对话框

9. 完成上述操作后，开始定义边界条件。单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在中间的 Boundary Conditions 控制面板中可以看到在 Gambit 中定义好的边界条件名称（inlet、outlet 和 wall）。首先在 Zone 中选中 inlet，保持 Phase 为 mixture，单击 Edit... 按钮，弹出图 7-22 所示的 Velocity Inlet 对话框。在其中选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity (%)中输入 1，在 Hydraulic Diameter (m)中输入 0.5，单击 OK 按钮。然后保持 Zone 中选中 inlet，设置 Phase 为 water-liquid，单击 Edit... 按钮，弹出图 7-23 所示的 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude（m/s）为 1.5；设置 Phase 为 oil，单击 Edit... 按钮，弹出图 7-24 所示的 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude（m/s）为 1.5，并单击 Multiphase 选项卡，设置 Volume Fraction 为 0.2（见图 7-25）。然后在 Zone 中选中 outlet，保持 Phase 为 mixture，单击 Edit... 按钮，弹出图 7-26 所示的 Outflow 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。

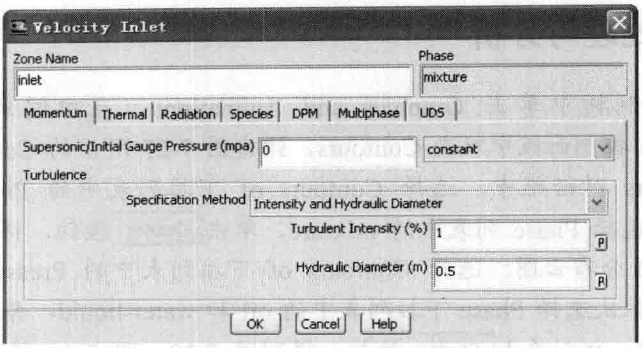


图7-22 Velocity Inlet 对话框（湍动强度和水力直径）

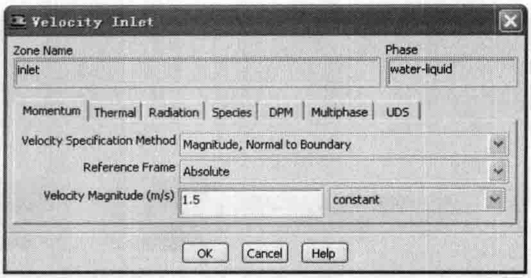


图7-23 Velocity Inlet 对话框（水相速度）

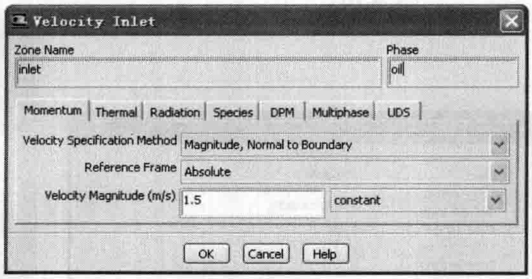


图7-24 Velocity Inlet 对话框（油相速度）

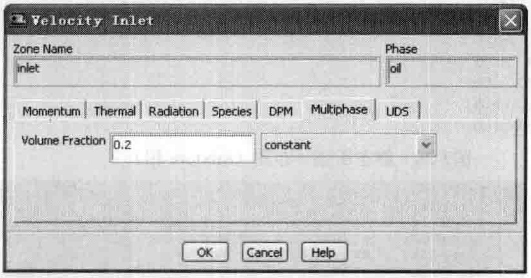


图7-25 Velocity Inlet 对话框（油相体积分数）



图7-26 Outflow 对话框

10. 边界定义好后，在左侧控制树中单击 Solution Methods，这里保持默认设置，不做改动。
11. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，可以看到中间控制面板中各参数的松弛因子，这里不做改动，保持默认设置。
12. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 inlet，这时 Initial Values 中的值会有所变化，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮完成初始化。
13. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 7-2.cas。
14. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 按钮开始解算。

7.2.5 结果后处理与分析

1. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 7-27 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure 和 Static Pressure，选择 Phase 列表中的 mixture，单击 Display 按钮，得到图 7-28 所示的静态压强分布云图；选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure 和 Dynamic Pressure，依次选择 Phase 下拉列表中的 oil 和 water-liquid，并选中 Options 下方的 Filled，分别单击 Display 按钮，得到图 7-29、图 7-30 所示的动态压强分布云图。

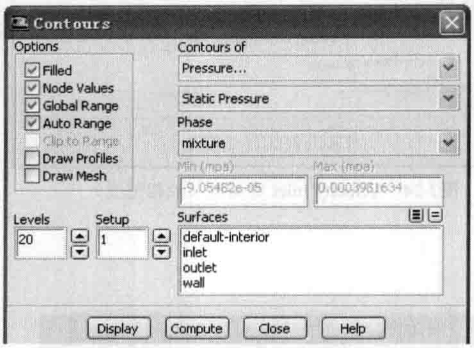


图7-27　Contours 操作面板

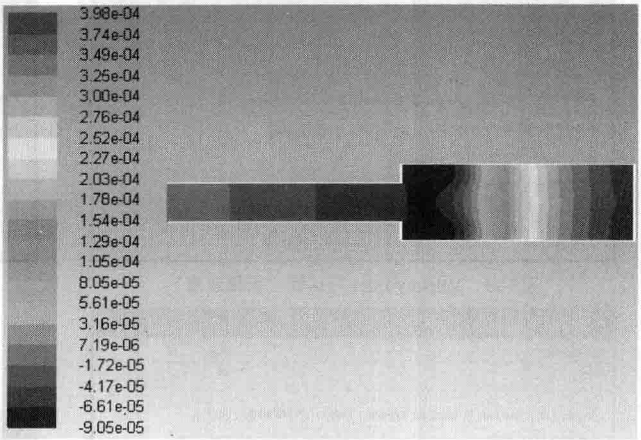


图7-28　静态压强分布图（mixture 相）

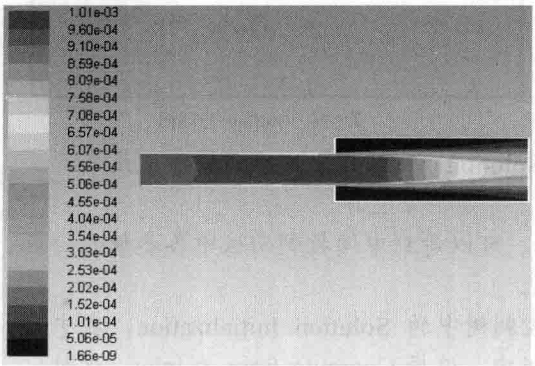


图7-29　动态压强分布图（oil 相）

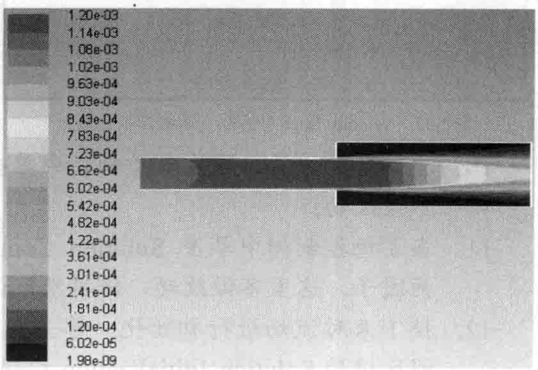


图7-30　动态压强分布图（water-liquid 相）

2. 接着，改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Velocity 和 Velocity Magnitude，并依次选择 Phase 下拉列表中的 oil 和 water-liquid，单击 Display 按钮，可得油和水的速度分布云图，如图 7-31 和图 7-32 所示。
3. 接着，改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Phases 和 Volume fraction，并选择 Phase 下拉列表中的 oil，单击 Display 按钮，可得油的体积分数云图，如图 7-33 所示。改变 Phase 为 water-liquid，可得水的体积分数云图，如图 7-34 所示。

4. 选择 File→Write→Data 命令，将结果保存为 7-2.dat。

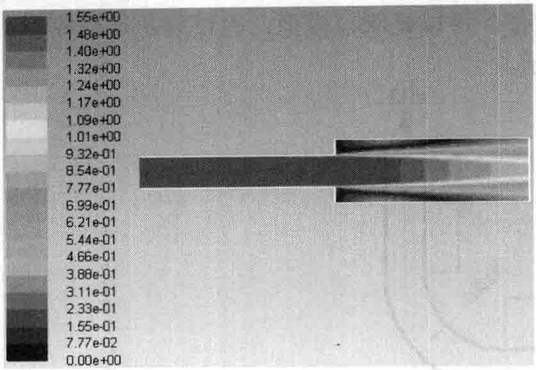


图7-31　速度分布云图（oil 相）

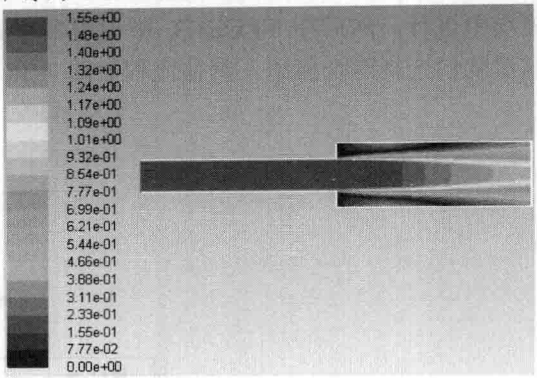


图7-32　速度分布云图（water-liquid 相）

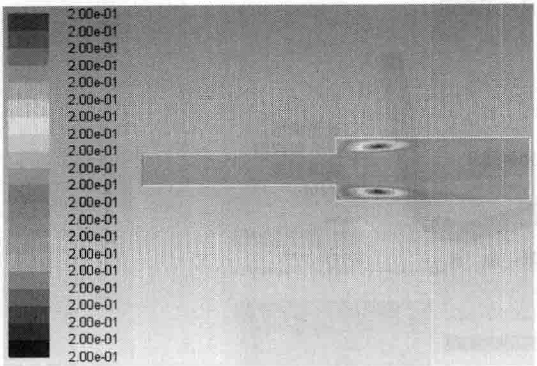


图7-33　油体积分数

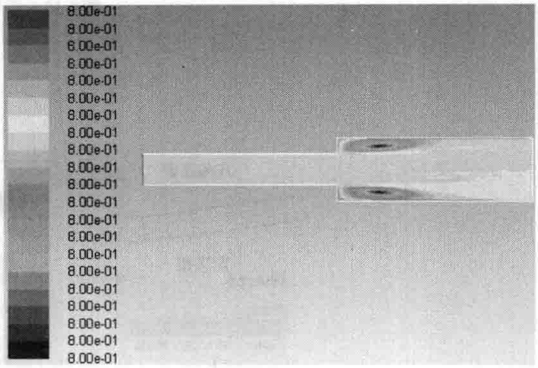


图7-34　水体积分数

5. 选择 File→Exit 命令，退出 FLUENT。

7.3 弯管内油水两相流动分析

弯管广泛应用于石化行业。在原油的集输过程中，管道中多为油水两相流，流动较为复杂，在通过弯管时会发生流场突变。通过FLUENT多相流模型，研究弯管油水两相流动的速度、压力分布的特性，可以为管道安全运行、弯管设计提供有利的参考。

7.3.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 7-35 所示，弯管的内径为 600mm，弯管段中心线的曲率半径为 1500mm，弯管转角 90º，弯管段两端的直管段长度为 4000mm，油水混合物从下端水平直管段进口流入，经过弯管后从垂直直管段末端出口流出，油相和水相的体积分数分别为 0.8 和 0.2，油相密度为 960kg/m^3，水相密度为 998kg/m^3。

【思路分析】

本例为三维的两相流动模拟，首先要建立三维模型。弯管模型可由 ANSYS 自带的 DM 建模，也可由其他 CAD 软件绘制，导入到 DM 中进行填充流体域的修改以及边界的命名。

本例将直接给出弯管的几何文件，导入DM即可，网格的划分可在ANSYS自带的Meshing模块中进行，然后在FLUENT中调用多相流模型。可以是欧拉模型，也可以是混合模型，这里我们选择混合模型。具体流程如图7-36所示。

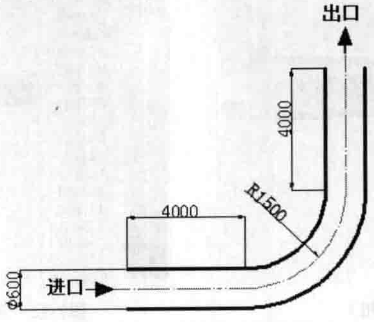


图7-35 弯管的尺寸示意图

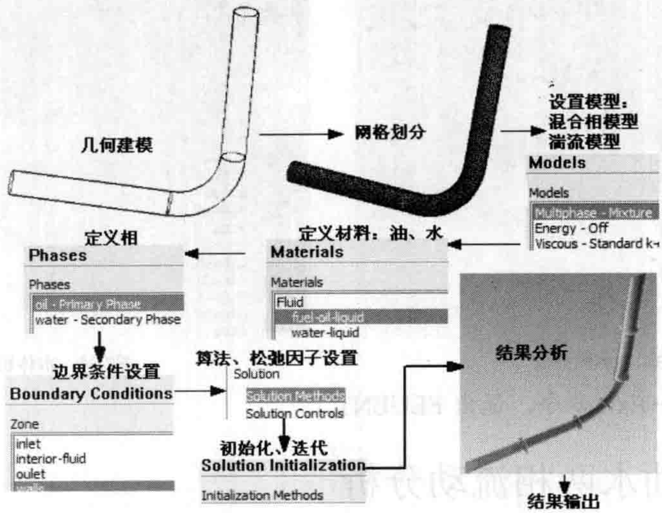


图7-36 弯管内油水两相流动分析模拟流程

起始文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\gongchengwanguan.x_t”文件。

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\7-3.msh、7-3.cas、7-3.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch7\7-3.avi”文件。

7.3.2 几何建模

1. 双击Workbench 14.5图标，进入Workbench 14.5的工作环境，在Workbench 14.5的工具箱Toolbox→Analysis Systems中，双击Fluid Flow（Fluent）或直接拖入项目视图区Project Schematic，生成项目A；如图7-37所示，双击项目A中的Geometry，选择单位标准为mm，单击OK按钮，进入DM工作界面。

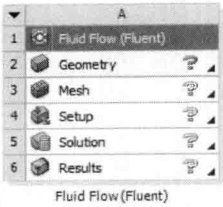


图7-37　Fluid Flow（Fluent）示意图

2. 导入几何文件生成几何体。选择 File→Import External Geometry File 命令，如图 7-38 所示，在弹出的文件选择对话框中，选择几何文件 gongchengwanguan.x_t，单击“打开”按钮，导入几何文件。如图 7-39 所示，在 Tree Outline 模型树下出现导入的几何体 Import1，单击 Generate 按钮生成图 7-40 所示弯管几何体。

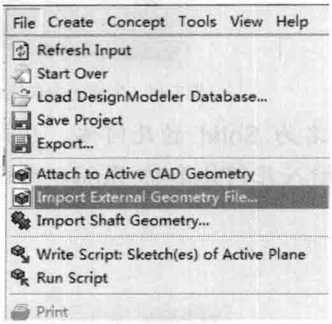


图7-38　File 菜单

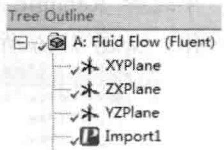


图7-39　Tree Outline 工作界面

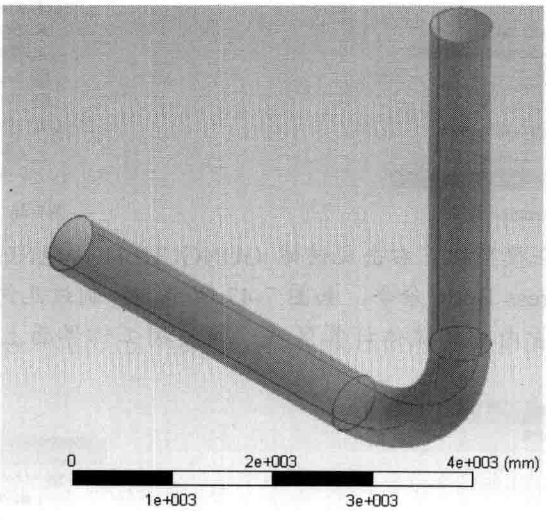


图7-40　导入的弯管

3. 生成流体区域。选择 Tools→Fill 命令，如图 7-41 所示。按住 Ctrl 键，选中弯管的所有内表面，如图 7-42 所示，共计 4 个面，在模型树下的 Details View 工作界面中 Details of Fill1 的 Faces 处单击 Apply 按钮，如图 7-43 所示，单击 Generate 按钮，生成名为 Solid 的几何体（见图 7-44）。

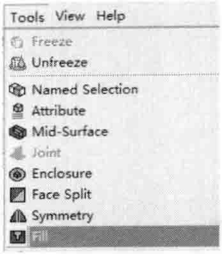


图7-41 Tools 菜单

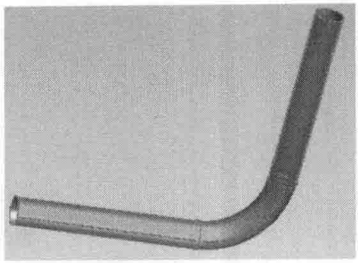


图7-42 选中弯管内表面

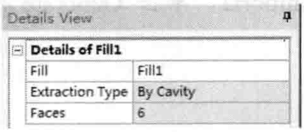


图7-43 Details View 工作界面

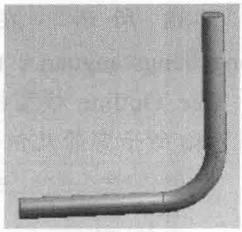


图7-44 生成的内部流体区域

4. 重命名几何体。右击模型树中刚刚生成的名为 Solid 的几何体，在弹出的菜单中选择 Rename 命令，如图 7-45 所示。输入几何体名称 fluid，重命名该几何体，如图 7-46 所示。

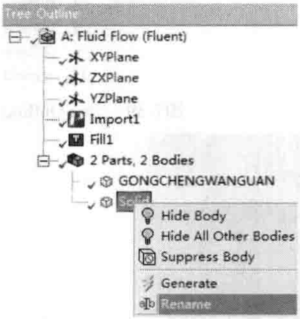


图7-45 Rename 命令

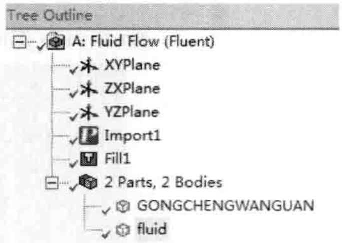


图7-46 重命名后的显示

5. 抑制几何体。在模型树下右击几何体 GONGCHENGWANGUAN，在弹出的菜单中选择 Suppress Body 命令，如图 7-47 所示，抑制该几何体，此时图形显示区域仅显示弯管内部的流体计算区域，模型树工作界面上显示弯管被抑制，如图 7-48 所示。

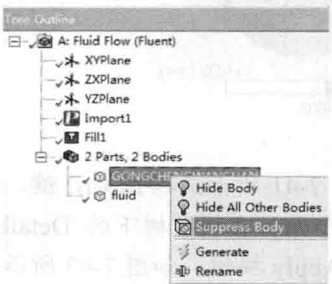


图7-47 Suppress Body 命令

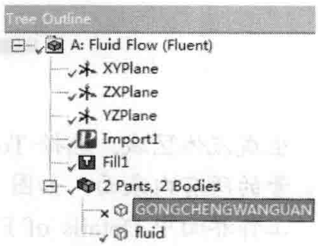


图7-48 抑制后显示

6. 命名进口。如图 7-49 所示，选中弯管入口的圆面，单击右键，在弹出的菜单

中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Name Selection 栏中输入 inlet，接着在 Geometr 栏中单击 Apply 按钮（见图 7-50），单击 Generate 按钮。

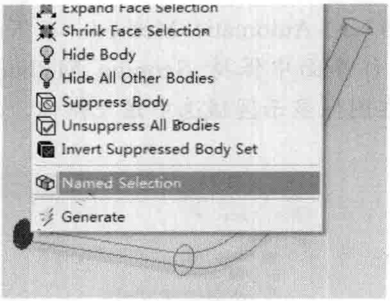


图7-49 Named Selection 命令

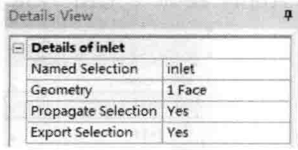


图7-50 Details View 工作界面

7. 命名出口。如图 7-51 所示，选中弯管出口的圆面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Name Selection 栏中输入 outlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮（见图 7-52），单击 Generate 按钮。

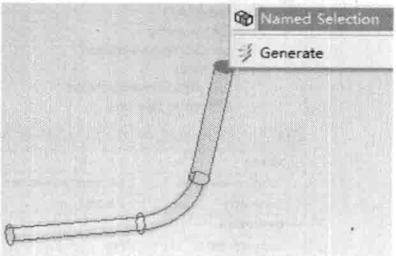


图7-51 Named Selection 命令

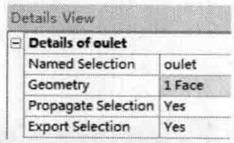


图7-52 Details View 工作界面

8. 命名壁面。如图 7-53 所示，按住 Ctrl 键，选中弯管的侧面，共计 6 个面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 walls，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮（见图 7-54），单击 Generate 按钮。

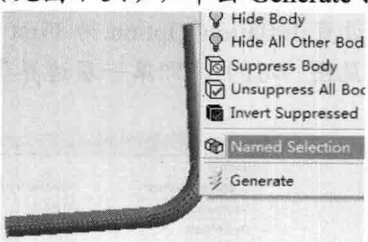


图7-53 Named Selection 命令

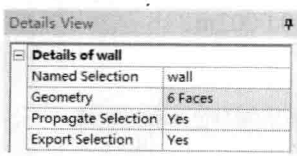


图7-54 Details View 工作界面

9. 输出几何文件。选择 File→Export 命令，保存几何文件 7-3.agdb；选择 File→Exit 命令，安全退出。

7.3.3 网格划分

1. 在 Workbench 的项目视图区 Project Schematic，双击 Fluid Flow(Fluent)中的 A3

选项 Mesh（见图 7-55），进入网格划分的工作界面。

2. 设置几何体网格划分方法。在 Outline 工作界面上右击 Mesh，在弹出的菜单中选择 Insert→Method 命令（见图 7-56）；在图像显示区域，选中该几何体（见图 7-57）；在 Outline 工作界面选中刚刚插入的 Automatic Method，在下面的 Details of “Automatic Method”-Method 工作界面中保持 Scoping Method 为 Geometry Selection，其他选项保持默认，在图像显示区域选中该几何体，单击 Apply 按钮（见图 7-58）。

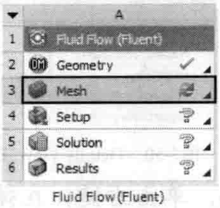


图7-55　Project Schematic 项目视图区

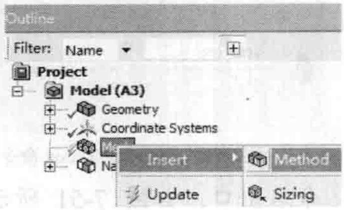
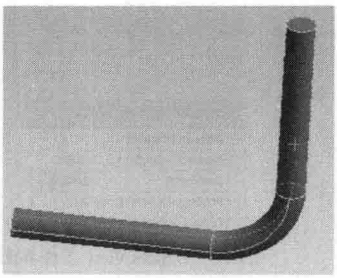


图7-56　添加网格划分方法


图7-57　选取几何体

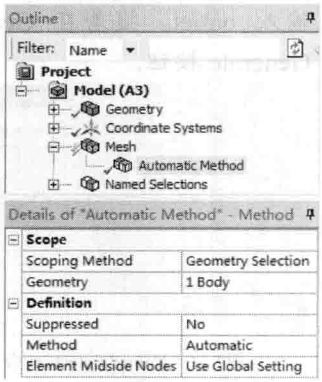


图7-58　划分方法界面

3. 插入膨胀。在 Tree Outline 中选中 Automatic Method，单击右键，在弹出的菜单中选择 Inflate This Method 命令（见图 7-59），在图像显示区域，按住 Ctrl 键单击选取几何体的壁面（见图 7-60），在 Outline 下方出现的 Details of “Inflation”-Inflation 中单击 Apply 按钮，并设置 Inflation Option 为 First Layer Thickness，First Layer Height 为 0.0002（见图 7-61），即第一层边界厚度为 0.0002m。

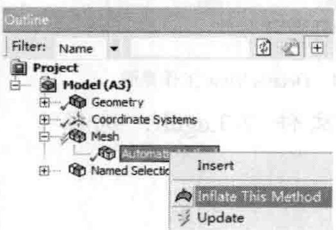
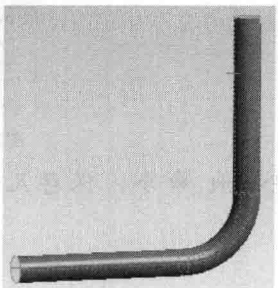


图7-59　添加膨胀


图7-60　选取几何体壁面

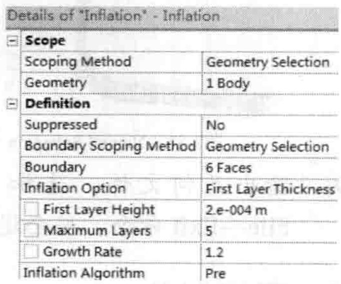
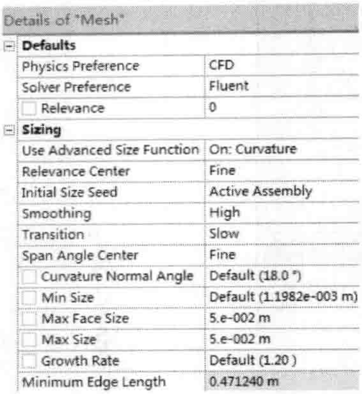


图7-61　Details of “Inflation”-Inflation 工作界面

4. 在 Outline 工作界面上，单击 Mesh，在 Outline 下方出现的 Details of “Mesh”

中设置参数，如图 7-62 所示；单击 Generate Mesh 按钮生成网格，流体域划分网格如图 7-63 所示。



Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Min Size	Default (1.1982e-003 m)
Max Face Size	5.e-002 m
Max Size	5.e-002 m
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	0.471240 m

图7-62　Details of “Mesh”操作界面

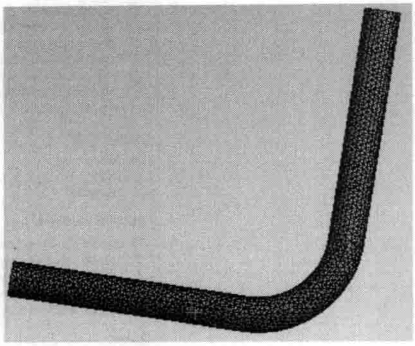


图7-63　网格划分结果

5. 选择 File→Export 命令，保存网格文件 7-3.msh。

7.3.4　FLUENT 中的求解设置

1. 在 Workbench 14.5 的项目视图区 Project Schematic 的 A 工程中，双击 Setup，出现 Fluent Launcher 对话框，单击 OK 按钮，进入模型计算设置的工作界面。
2. 进行 General 设置。选择 General→Mesh→Scale 命令，出现 Scale Mesh 对话框，查看几何尺寸，单击 Close 按钮；单击 Check 按钮，检查网格；选中 Gravity，在 Y 处输入数字-9.8，表示在 y 轴向下加一个重力加速度，大小为 9.8m^2/s，如图 7-64 所示。
3. 进行多相流模型设置。选择 Models→Multiphase→Edit 命令，出现 Viscous Medel 对话框，设置多相流模型，在 Model 选项框中选择 Mixture，在 Number of Eulerian Phases 下的文本框输入 2，设置模型的相数为两相，单击 OK 按钮（见图 7-65）。

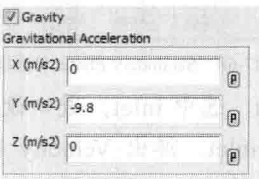


图7-64　General 操作界面

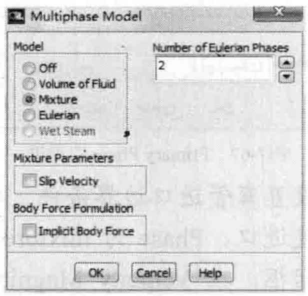


图7-65　Multiphase Model 对话框

4. 进行湍流模型设置。选择 Models→Viscous→Edit 命令，出现 Viscous Medel 对话框，在该对话框中选中标准 k-ε 模型，其他参数保持不变，单击 OK 按钮（见图 7-66）。

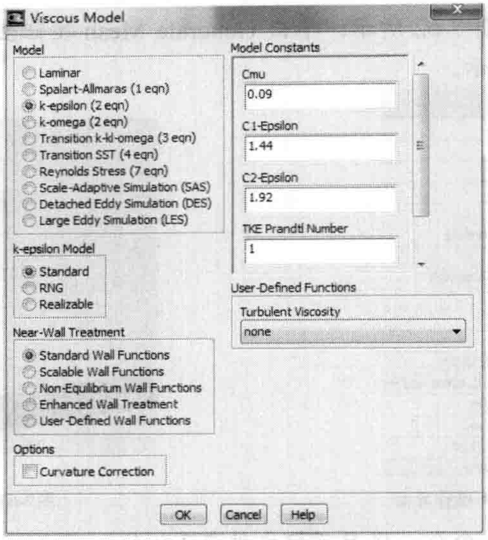


图7-66 Viscous Medel 面板

5. 进行材料设置。选择 Meterials→Fluid→Create/Edit 命令，出现 Create/Edit Materials 对话框，单击 Fluent Database 按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中选择 fuel-oil-liquid（c19h30<l>），单击 Copy 按钮。再在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中选择 water-liquid（h2o<l>），单击 Copy 按钮，单击 Close 按钮。最后，单击 Create/Edit Materials 对话框中的 Close 按钮。
6. 设置 Phase。选中 phase-1-Primary Phase，单击 Edit 按钮，弹出 Primary Phase 对话框（见图 7-67），将 Name 设置为 oil，Phase Material 选为 fuel-oil-liquid，单击 OK 按钮。
7. 在 Phase 操作界面选中 phase-2-Secondary Phase，单击 Edit 按钮，弹出 Secondary Phase 对话框（见图 7-68），将 Name 设置为 water，Phase Material 选为 water-liquid，单击 OK 按钮。

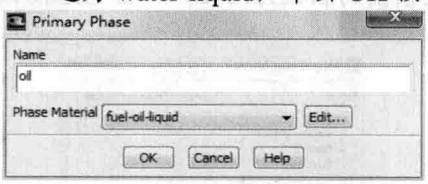


图7-67 Primary Phase 对话框

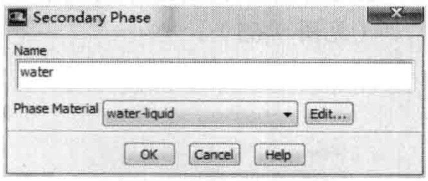


图7-68 Secondary Phase 对话框

8. 设置弯管进口边界条件。单击 Boundary Conditions，选中 inlet，进口设置为速度进口，Phase 为 mixture，单击 Edit 按钮或双击 inlet，弹出 Velocity Inlet 对话框，在 Velocity Magnitude（m/s）后的文本框中输入 2，即设置入口速度为 2m/s，在 Turbulent 栏中的 Specification Method 下拉列表中选择为 Intensity and Hydraulic Diameter，输入 Turbulent Intensity 为 1%，Hydraulic Diameter 为 0.6（见图 7-69），单击 OK 按钮。

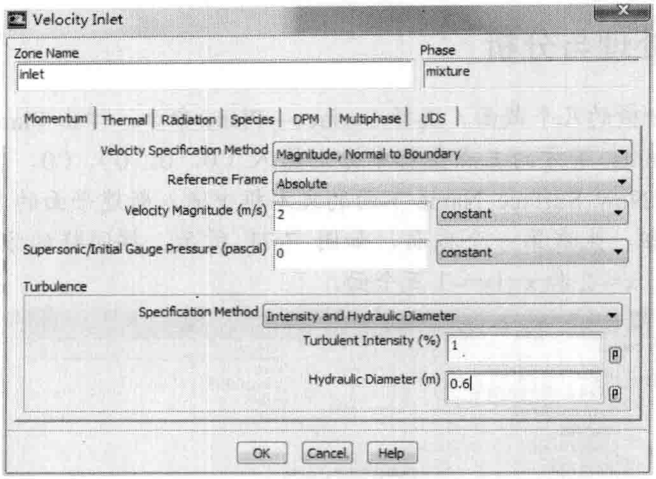


图7-69　Velocity Inlet 对话框（Momenton 选项设置）

9. 选中 inlet，将 Phase 改为 water，单击 Edit 按钮或双击 inlet，弹出 Velocity Inlet 对话框，选中 Multiphase 选项卡，设置 Multiphase 中的体积分数为 0.2（见图 7-70），单击 OK 按钮。

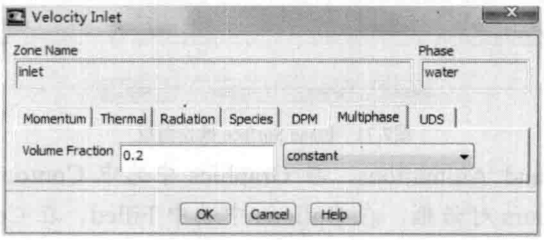


图7-70　Velocity Inlet 对话框（Multiphase 选项设置）

10. 设置出口边界条件。选中 outlet，在 Type 下拉列表中选择 outflow，设置为自由流出出口，Phase 为 mixture，单击 Edit 按钮或双击 outlet，弹出 Outflow 对话框，输入 Flow Rate Weighting 为 1。
11. 单击 Solution Methods 设置求解方法，这里保持默认，单击 Solution Controls 设置迭代松弛因子，这里保持默认。
12. 选择 Monitors→Residuals-Print,plot 命令，单击 Edit 按钮，弹出 Reidual Monitors 对话框，设置解算的残差曲线，选中 plot 以打开残差曲线图，将 continuity、x-velocity、y-velocity、z-velocity 的收敛精度设为 0.00001，其他保持默认，单击 OK 按钮。
13. 选择 File→Write→Case 命令，保存工程文件为 7-3.cas。
14. 单击 Solution Initialization 进行初始化，在 Initialization Methods 选项框中选择 Standard Initialization，在 Compute from 下拉列表中选择 inlet，其他保持默认，单击 Initialize 按钮开始初始化。
15. 单击 Run Calculation，设置 Number of Iterations 为 5000，单击 Calculate 按钮开始解算，迭代收敛后停止计算。选择 File→Write→Data 命令，保存数据文件 7-3.dat。

7.3.5 结果后处理与分析

1. 截取有助分析的几个截面。选择 Surface→Plane 命令，弹出 Plane Surface 对话框，在 Points 下方的三点坐标中分别输入（0，0，0）、（0，1，0）和（1，0，0），在 New Surface Name 下面的文本框中输入新建平面的名字 z=0，单击 Create 按钮，生成第一个截面，如图 7-71 所示。按同样的方法生成 y=2、y=0、x=0、x=–2 和 x=1y=–1 五个面。

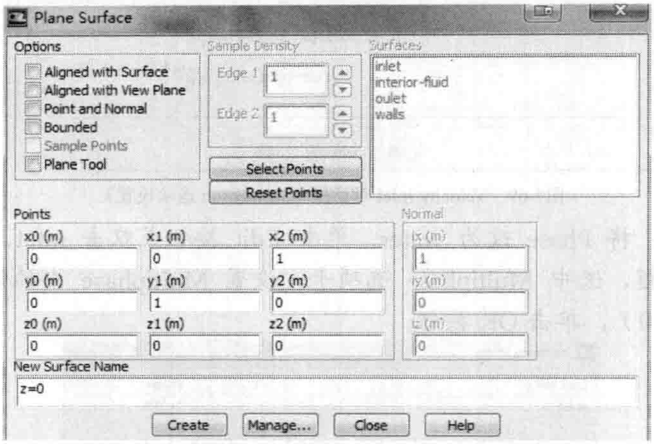


图7-71 Plane Surface 操作面板

2. 单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Contours，单击 Set Up 按钮，弹出 Contours 对话框，在 Options 中选中 Filled，在 Contours of 下拉列表中选择 Pressure，在 Surfaces 列表中选择刚刚生成的 z=0、y=2、y=0、x=0、x=–2 和 x=1y=–1，如图 7-72 所示。单击 Display 按钮，弯管中心对称面和几个关键截面的压力云图如图 7-73 所示。

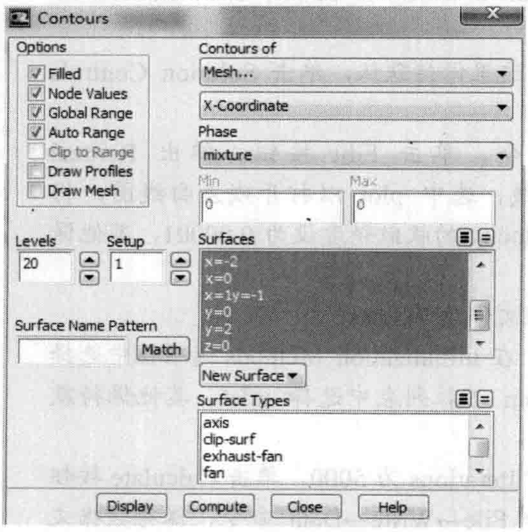


图7-72 Contours 对话框

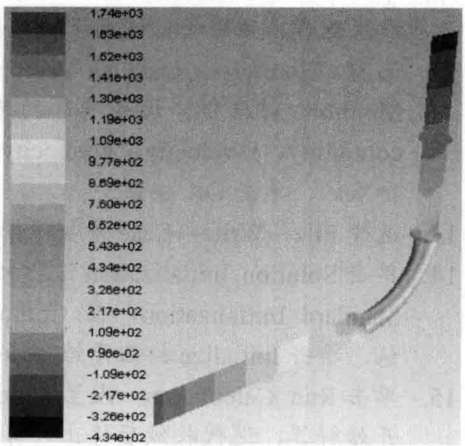


图7-73 弯管中心对称面和几个关键截面的压力云图

3. 紧接着，在 Contours of 下拉列表中选择 Velocity，单击 Display 按钮。弯管中心对称面和几个关键截面的速度云图如图 7-74 所示。

4. 在 Contours of 下拉列表中选择 Phases，在 Phase 下拉列表中选择 oil，单击 Display 按钮。弯管中心对称面和几个关键截面油相的体积分数云图如图 7-75 所示。

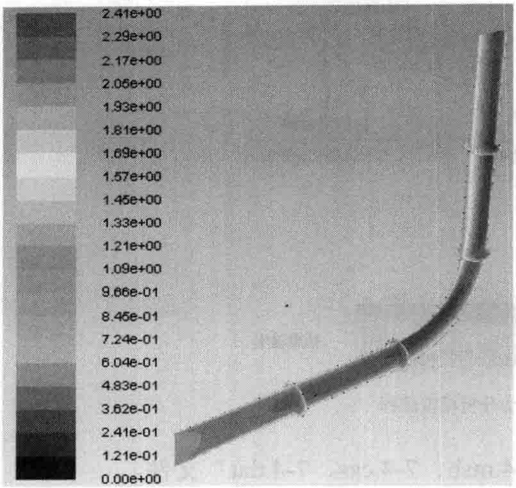


图7-74 弯管中心对称面和几个关键截面的速度云图

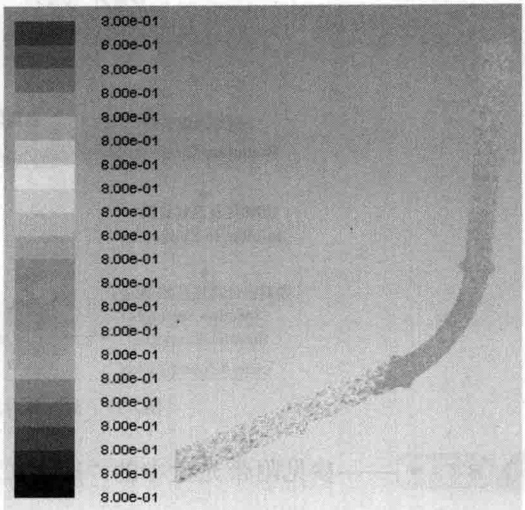


图7-75 弯管中心对称面和几个关键截面油相的体积分数云图

7.4 节流阀内油品流动分析

在石油天然气的开采、提炼加工和管道输运系统中，节流阀的应用较为频繁。若节流阀型号与尺寸选取、输运技术参数设计不当，就有可能造成管体振动、节流阀处生成水合物等安全事故，给生产和生活带来巨大的损失。因此对节流阀内的流动进行仿真模拟十分必要。这里我们针对节流阀内油品流动问题进行仿真模拟。

7.4.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

本例的节流阀几何模型如图 7-67 所示，水平放置管道内径为 0.05m，节流嘴口径为 0.01m。

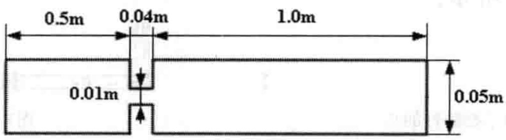


图7-76 节流阀尺寸示意图

【思路分析】

本例需考虑重力影响，由于节流阀后速度较大，为湍流流动，因此选取 k-epsilon[2eqn] 模型。整个模拟计算流程如图 7-77 所示。

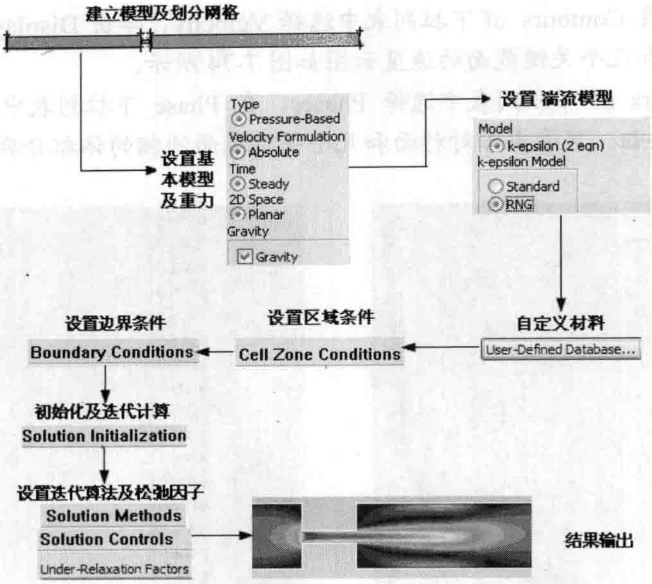


图7-77　节流阀内油品流动分析模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\7-4.msh、7-4.cas、7-4.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch7\7-4.avi”文件。

7.4.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击 → → 按钮，依次创建坐标（0，0，0）、(0，0.05，0)、(0.5，0，0)、(0.5，0.02，0)、(0.5，0.03，0)、(0.5，0.05，0)、(0.54，0，0)、(0.54，0.02，0)、(0.54，0.03，0)、(0.54，0.05，0)、(1.54，0，0)和(1.54，0.05，0)共 12 个点，如图 7-78 所示。
2. 单击 → → 按钮，打开 Create Straight Edge 面板，创建点 1（vertix.1）与点 2（vertix.2）、点 2 与点 3、点 3 与点 4、点 4 与点 8、点 8 与点 7、点 7 与点 11、点 11 与点 12、点 12 与点 10、点 10 与点 9、点 9 与点 5、点 5 与点 6、点 6 与点 1、点 4 与点 5 和点 8 与点 9 之间的线段，共 14 条线段，如图 7-79 所示。



图7-78　绘制好的点

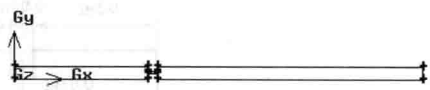


图7-79　绘制的线段

3. 将线段 1、线段 2、线段 3、线段 11、线段 12、线段 13 组成一个面，线段 4、线段 10、线段 13、线段 14 和线段 5、线段 6、线段 7、线段 8、线段 9、线段 14 分别组成两个面，单击 → → 按钮，在 Create Face from Wireframe 面板的 Edge 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何面。本例生成的三个面如图 7-80 所示。

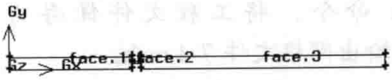


图7-80　绘制好的面

7.4.3　网格划分

1. 单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 黄色输入栏中选中线段 1、线段 7，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 10，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。
2. 选中线段 2、线段 12，两根线的红色箭头由下指向上，设置 Ratio 的节点距离比例为 0.98，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 100，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。
3. 选中线段 6、线段 8，两根线的红色箭头由上指向下，设置 Ratio 的节点距离比例为 0.98，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 200，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。
4. 选中线段 3、线段 5，线段 9 和线段 11，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 16，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。
5. 选中线段 13、线段 14，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 10，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。
6. 选中线段 4、线段 10，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 50，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格，划分好的线网格如图 7-81 所示。
7. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的面 1 和面 3，运用 Tri 单元与 Pave 方法对这两个面进行划分，其他设置保持默认。选中已经完成线网格划分的面 2，运用 Quad 单元与 Map 方法对其进行划分，其他设置保持默认，其生成的面网格如图 7-82 所示。



图7-81　线网格的划分



图7-82　网格的划分

8. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将线段 1 定义为压力入口（PRESSURE_INLET），名称为 in；将线段 7 定义为压力出口（PRESSURE_OUTLET），名称为 out；将线段 2、线段 3、线段 4、线段 5、线段 6、线段 8、线段 9、线段 10、线段 11、线段 12 定义为壁面（WALL），名称为 wall；线段 13 和线段 14 不做定义，表示其为内部区域，定义好的边界如图 7-83 所示。

Name	Type
in	PRESSURE_INLET
out	PRESSURE_OUTLET
wall	WALL

图7-83　定义好的边界类型

9. 选择 File→Save As 命令，将工程文件保存为“7-4”。同时，选择 Export→Mesh 命令，输出网格文件 7-4.msh。

7.4.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→ Read→ Mesh 命令，读入划分好的网格文件 7-4.msh。在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。
3. 单击 Problem Setup 的 General 中的 Scale，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。
4. 本例的原油速度较大，故应为湍流流动。在 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，在弹出的 Viscous Model 对话框中选中 k-epsilon（2 eqn），在 k-epsilon Model 选项下选择 RNG，其他所有选项保持默认（见图 7-84），单击 OK 按钮。

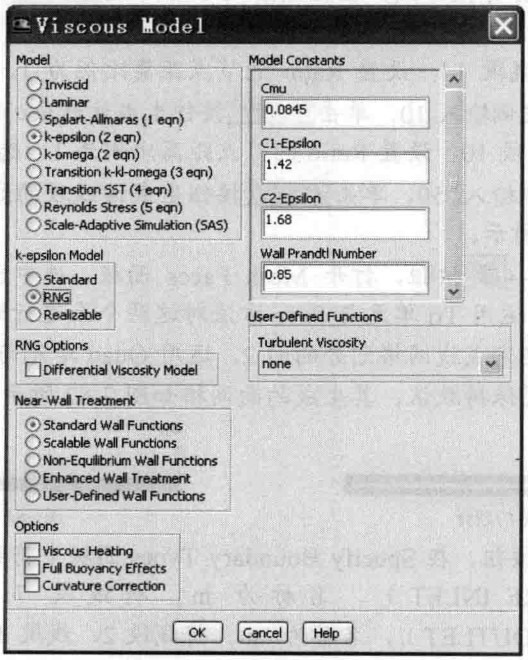


图7-84 Viscous Model 对话框

5. 由于材料库中没有原油这一材料，需要用户自己定义。单击 Create/Edit Materials 对话框右侧的 User-Defined Database... 按钮，弹出图 7-85 所示的 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入“new materials”，然后单击 Browse... 按钮，弹出图 7-86 所示的 User-Defined Database Materials 对话框。在 User-Defined Database Materials 对话框中定义原油的类型为 fluid，名称为

yuanyou，物性参数如图 7-86 所示.单击 Save 和 Copy 按钮，将定义好的原油保存在自定义材料数据库中，并导入到当前工程中进行计算。完成后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。回到 Materials 对话框中，即会发现在 Materials 的 Fluid 下拉列表中存在了空气和原油两种材料。

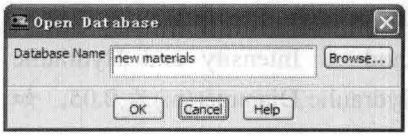


图7-85　Open Database 对话框

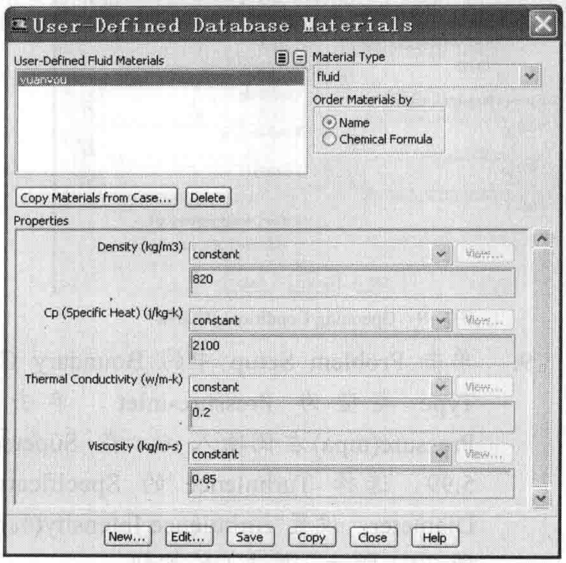


图7-86　User-Defined Database Materials 对话框

6.　单击 Problem Setup 的 General 中 Solver 下方的 Units... 按钮，打开 Set Units 对话框，如图 7-87 所示。选择 Quantities 中的 pressure，在 Units 可以看到目前工程中关于压强的单位。单击 New... 按钮，在弹出的 Define Unit 对话框中的 Unit 中输入名称 mpa，在 Factor 中输入 1000000（见图 7-88），单击 OK 按钮，定义压强的新单位 MPa。

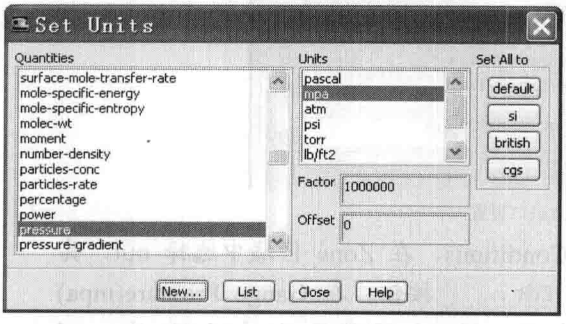


图7-87　Set Units 对话框

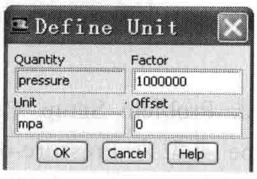


图7-88　Define Unit 对话框

7.　选择 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框，如图 7-89 所示，原油要考虑重力的影响，因此选中 Gravity，并设置 Y 为 –9.8，其他选项保持默认设置，单击 OK 按钮。

8.　接下来定义本例的边界条件。单击 Problem Setup 中的 Cell Zone Conditions，双击其面板中的 fluid，在弹出的 Fluid 对话框下 Material Name 右侧的下拉列表中选择 yuanyou，如图 7-90 所示，保持其他选项不变，单击 OK 按钮。

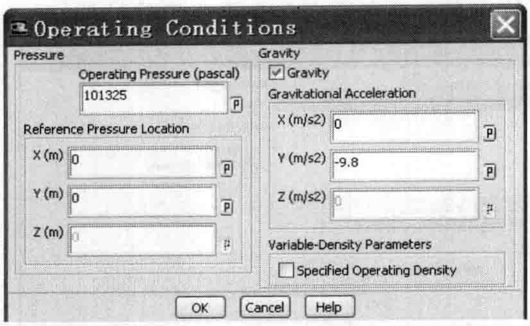


图7-89 Operating Conditions 对话框

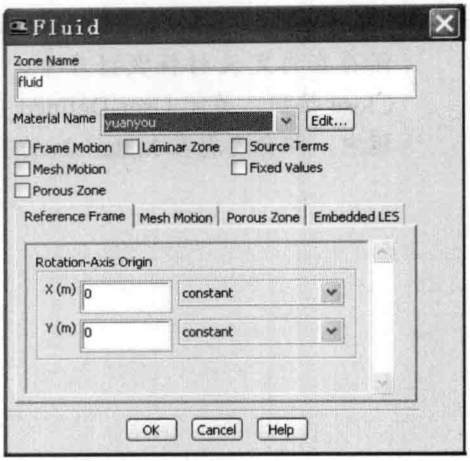


图7-90 Fluid 对话框

9. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在 Zone 区域中选择 in，其 Type 类型为 Pressure-inlet，单击 Edit... 按钮。在 Gauge Total Pressure(mpa)右侧输入 6，在 Supersonic/Initial Gauge Pressure(mpa)中输入 5.99。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter(m)为 0.05。如图 7-91 所示，单击 OK 按钮。

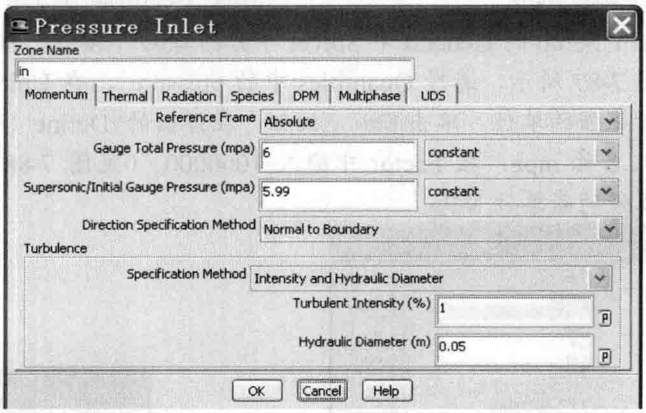


图7-91 压力进口设置

10. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在 Zone 区域中选择 out，其 Type 类型为 Pressure-outlet，单击 Edit... 按钮。在 Gauge Pressure(mpa)右侧输入 5.9。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulence Intensity(%)为 1，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 0.05，如图 7-92 所示，单击 OK 按钮。由于本例油流在高压差作用下快速流动，可忽略管壁粗糙度对流动的影响，故不需要定义 wall 边界。

11. 边界定义完成后，对求解参数进行设置。单击 Solution 中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认算法设置。

12. 接下来单击 Solution 中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，保持

默认的松弛因子设置。

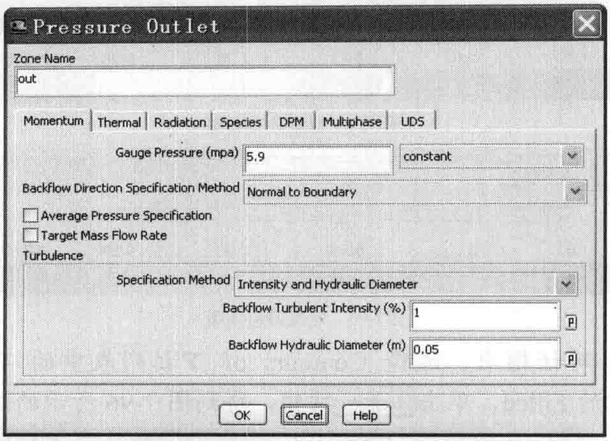


图7-92　压力出口设置

13. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 in，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮，完成初始化。
14. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的“Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
15. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 按钮开始解算。迭代至 249 步问题收敛。

7.4.5 结果后处理与分析

1. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 7-93 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-94 所示的速度分布云图。
2. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity，取消选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-95 所示的速度等值线图。

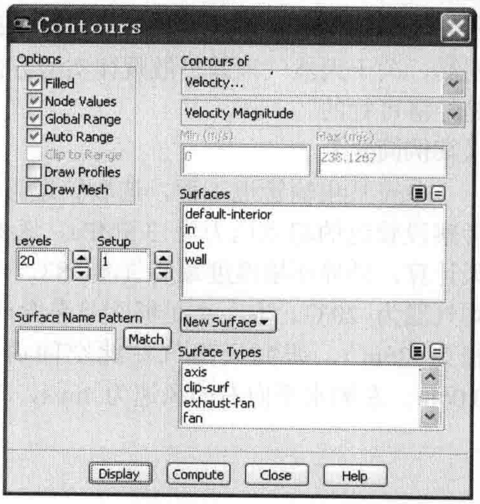


图7-93　Contours 对话框

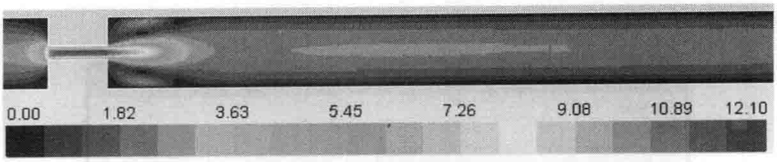


图7-94　速度分布云图

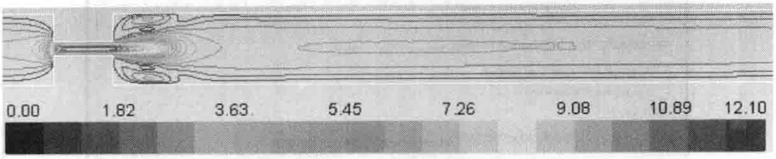


图7-95　速度等值线图

3. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Turbulence，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-96 所示的湍流动能。

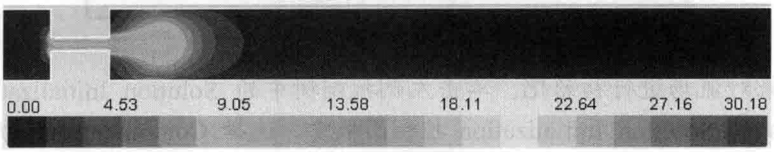


图7-96　湍流动能分布

4. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（7-4.cas 和 7-4.dat）。
5. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

7.5　输气管道泄漏扩散分析

7.5.1　案例简介与思路分析

天然气是工业生产的重要能源和原料，属于可燃性气体，天然气泄漏极易引起爆炸，严重威胁人们的生命及财产安全。目前基于这种气体的泄漏扩散研究较少，且仍处于初始阶段，一旦发生泄漏扩散事故，没有可靠的理论依据来进行应急处理。由于危险性高、实验费用高，关于天然气泄漏扩散规律实验方面的研究不易开展，因此基于数值方法开展相关研究是经济可行的。

【案例简介】

参照某集输管道工程，选取管道直径为 647.2mm，考察长度为两截断阀间距（5km），考察段管道的起点压力为 3.5MPa，天然气年均输量取 20×10^8m^3，设计年工作天数按 350 天计算，外界环境温度最高气温 38℃，最低温度为–10℃，平均气温为 16℃，天然气的年平均气温为 20℃。取一个足够大且包含泄漏区域以及扩散区域在内的空间（高 50m，泄漏半径为 25m），研究天然气在此空间内的扩散情况。泄漏口采用二维孔口模型，口径为 0.06m。左侧水平向右的风速为 4m/s，模型简图如图 7-97 所示。

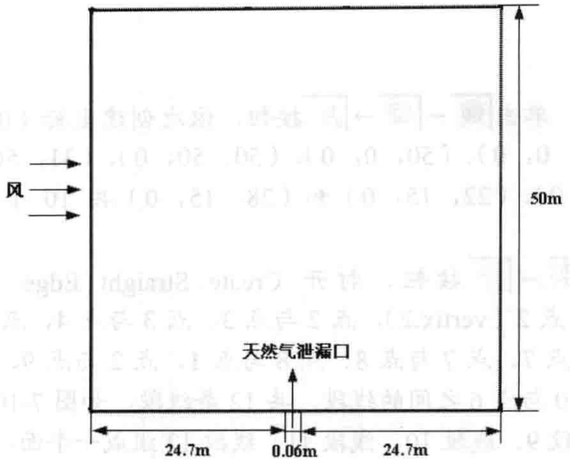


图7-97 计算区域尺寸

【思路分析】

高速气流经由泄漏口喷射出，在泄漏口上方一定高度内的速度梯度较大，因此有必要将计算区域划分成几块，且泄漏口上方的区域要网格细分。由于本例涉及泄漏扩散问题，因此应该采用组分输运模型（Species Transport），而不启用化学反应模型。整个模拟计算的流程如图 7-98 所示。



图7-98 输气管道泄漏扩散模拟流程图

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\7-5.msh、7-5.cas、7-5.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch7\7-5.avi”文件。

7.5.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击 → → 按钮，依次创建坐标（0，0，0）、(24.7，0，0)、（25.3，0，0）、（50，0，0）、（50，50，0）、（31，50，0）、（19，50，0）、（0，50，0）、（22，15，0）和（28，15，0）共 10 个点，如图 7-99 所示。
2. 单击 → → 按钮，打开 Create Straight Edge 面板，创建点 1（vertix.1）与点 2（vertix.2）、点 2 与点 3、点 3 与点 4、点 4 与点 5、点 5 与点 6、点 6 与点 7、点 7 与点 8、点 8 与点 1、点 2 与点 9、点 9 与点 7、点 3 与点 10、点 10 与点 6 之间的线段，共 12 条线段，如图 7-100 所示。
3. 将线段 2、线段 9、线段 10、线段 11、线段 12 组成一个面，线段 1、线段 7、线段 8、线段 9、线段 10 和线段 3、线段 4、线段 5、线段 11、线段 12 分别组成两个面。单击 → → 按钮，在 Create Face from Wireframe 面板的 Edge 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何面。本例生成的三个面如图 7-101 所示。

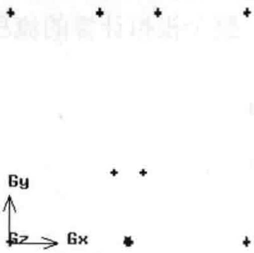


图7-99 绘制好的点

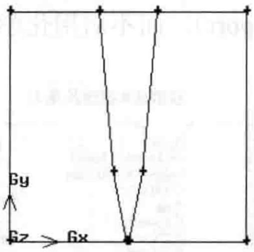


图7-100 绘制的线段

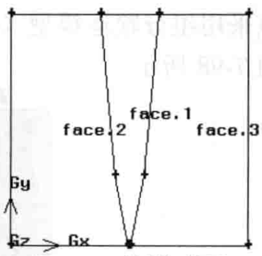


图7-101 绘制好的面

7.5.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 黄色输入栏中选中线段 1、线段 3、线段 5、线段 7，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 30，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。按照同样的方法，将线段 4、线段 8 分为 65 段；将线段 9、线段 11 分为 30 段；将线段 10、线段 12 分为 70 段；将线段 2 分为 12 段，将线段 6 分为 24 段，划分好的线网格如图 7-102 所示。
2. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的 3 个面，运用 Tri 单元与 Pave 方法对这 3 个面进行划分，其他设置保持默认，生成的面网格如图 7-103 所示。
3. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将泄漏口（edge.2）定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in；将左侧边（edge.8）定义为速度进口（VELOCITY_INLET），名称为 wind-in；将计算区域最上方的 3 条线（edge.5、edge.6、edge.7）及右侧边（edge.4）定义为压力出口（PRESSURE_OUTLET），名称分别为 top-1、top-2、top-3、right-out，定义好

的边界如图 7-104 所示。

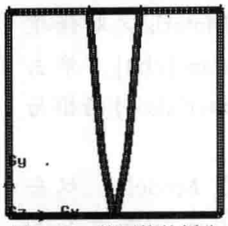


图7-102　线网格的划分

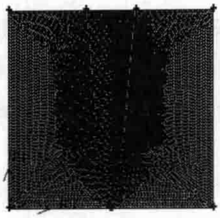


图7-103　网格的划分

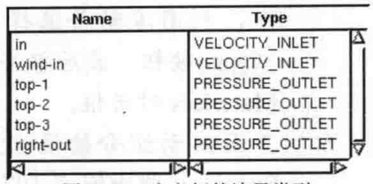


图7-104　定义好的边界类型

4. 选择 File→Save As 命令，将工程文件保存为“7-5”。同时，选择 Export→Mesh 命令，输出网格文件 7-5.msh。

7.5.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→ Read→ Mesh 命令，读入划分好的网格文件 7-5.msh。在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。
3. 单击 Problem Setup 的 General 中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。
4. 本例需要启动能量方程进行计算。单击 Problem Setup 的 Models，双击 Energy，弹出图 7-105 所示的 Energy 对话框，选中 Energy Equation，单击 OK 按钮。本例的甲烷速度较大，故应为湍流流动。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，在弹出的 Viscous Model 对话框中选中 k-epsilon（2 eqn），并选中 Options 栏中的 Full Buoyancy Effects（考虑全浮力影响），其他所有选项保持默认（见图 7-106），单击 OK 按钮。

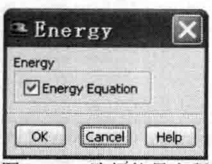


图7-105　选择能量方程

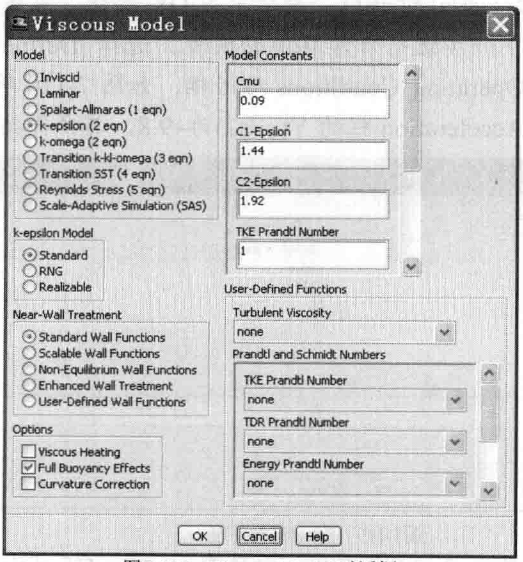


图7-106　Viscous Model 对话框

5. 本例涉及甲烷，故需要调用 FLUENT 自带的材料数据库。单击 Materials 对话框右侧的 FLUENT Database... 按钮，在弹出的 Fluent Fluid Materials 对话框中，利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的 methane[ch4]，单击 Copy 按钮。最后单击两次 Close 按钮，关闭 Fluent Fluid Materials 对话框与 Materials 对话框。
6. 下面启动组分输运与化学反映模型。单击左侧控制树中的 Models，双击 Species，弹出图 7-107 所示的 Species Model 对话框，在 Option 下选中 Inlet Diffusion 和 Diffusion Energy Source，即选择了入口扩散和扩散能量来源选项。接着在 Mixture Material 下拉列表中选择 methane-air，单击右侧的 Edit... 按钮，弹出图 7-108 所示的 Edit Material 对话框。

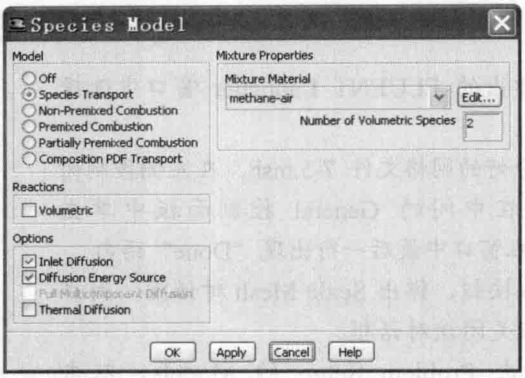


图7-107 Species Model 对话框

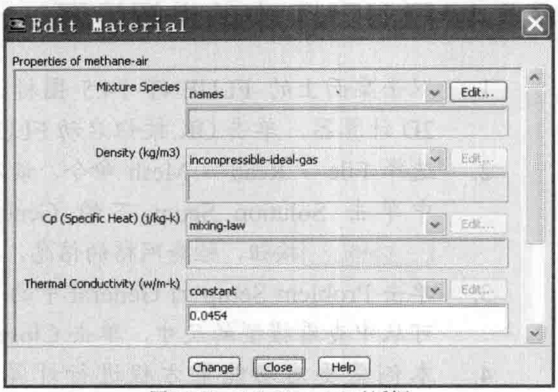


图7-108 Edit Material 对话框

7. 在 Edit Material 对话框中，单击 Mixture Species 右侧的 Edit... 按钮，弹出图 7-109 所示的 Species 对话框，其中的 Selected Species 为已经选组分列表，从上到下依次是甲烷、空气，满足质量分数逐渐增加的规律（最大组分——空气在最下端）。单击 OK 按钮关闭 Species 对话框，单击 Close 按钮关闭 Edit Material 对话框，最后单击 OK 按钮，完成组分输运与化学反应模型的定义。
8. 下一步进行计算环境的设置。选择 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 7-110 所示，选中 Gravity，设置 Gravitional Acceleration 栏的 Y(m/s2)为–9.8，其余保持默认设置，单击 OK 按钮。

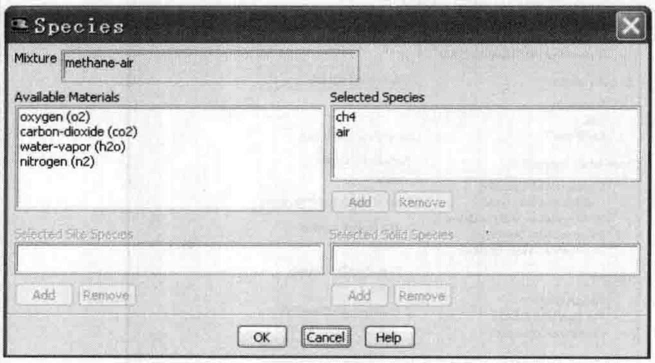


图7-109 Species 对话框

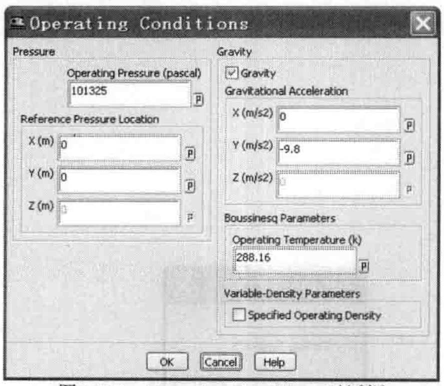


图7-110 Operating Conditions 对话框

9. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 in，其 Type 类

型为 Velocity-inlet，单击 Edit... 按钮，打开图 7-111 所示 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute。在 Velocity Magnitude(m/s)右侧输入 100。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter(m)为 0.06。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 选项卡，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 7-112 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 ch4，在 ch4 后面输入 1。因为管道出口只含有甲烷，设置完组分浓度后，单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

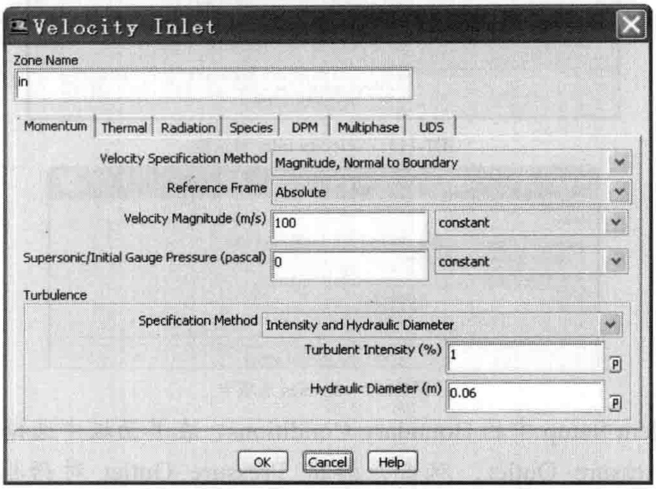


图7-111　Velocity Inlet 对话框

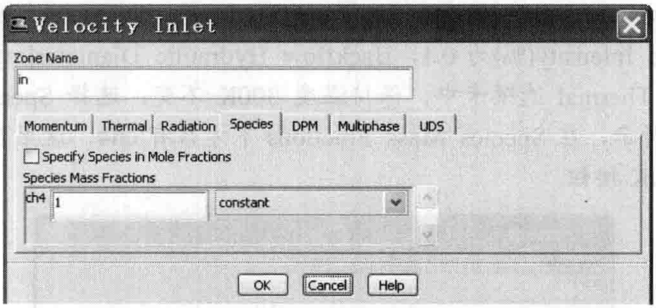


图7-112　Species 选项卡

10. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 wind-in，其 Type 类型为 Velocity-inlet，单击 Edit... 按钮，打开图 7-113 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute。在 Velocity Magnitude(m/s)右侧输入 4。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity(%)为 0.1，Hydraulic Diameter(m)为 50。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 选项卡，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 7-114 所示，在 Species Mass Fractions

下方的 ch4 后面输入 0。单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

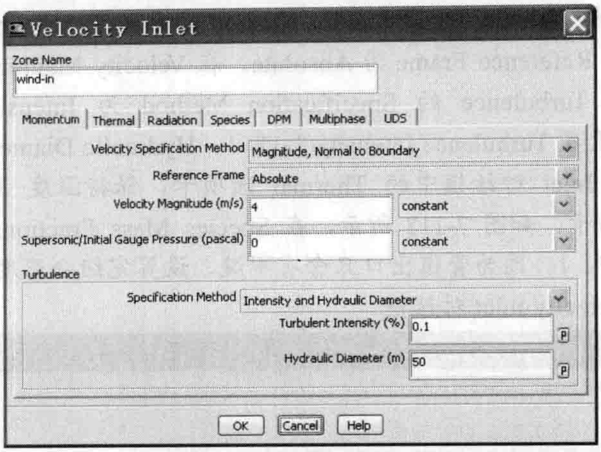


图7-113　Velocity Inlet 对话框

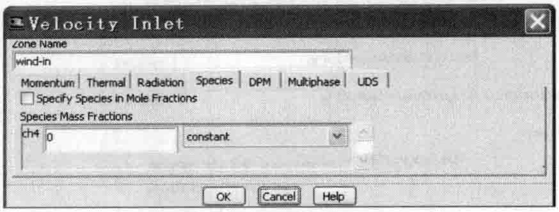


图7-114　Species 选项卡

11. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 top-1，其 Type 类型为 Pressure Outlet。双击，弹出 Pressure Outlet 对话框，保持 Gauge Pressure(pascal)为 0，即环境气压为 1 个大气压。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulence Intensity(%)为 0.1，Backflow Hydraulic Diameter[m]为 19（见图 7-115）。在 Thermal 选项卡中，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 7-116 所示，在 Species Mass Fractions 下方只有 ch4，这里在 ch4 后面输入 0，单击 OK 按钮。

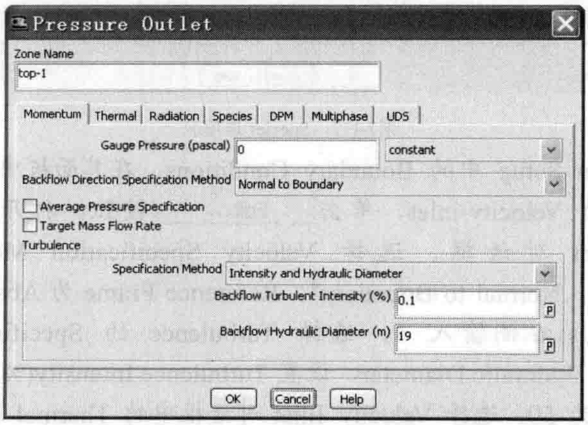


图7-115　Pressure Outlet 对话框

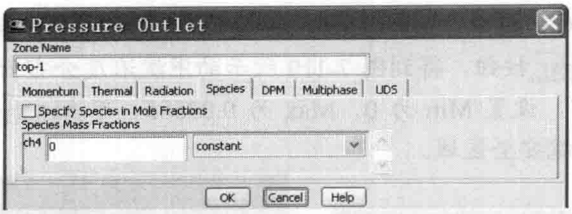


图7-116　Species 选项卡

12. 剩下的 top-2、top3 和 right-out 与 top-1 的定义相同，均为压强出口边界。不同的是各自的 Hydraulic Diameter(m)不同，分别为 12m、19m、50m。
13. 边界定义完成后，对求解参数进行设置。单击 Solution 中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认算法设置。
14. 接下来单击 Solution 中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。
15. 接下来对流场进行初始化，单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 in，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮，完成初始化。
16. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的“Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
17. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 按钮开始解算。

7.5.5 结果后处理与分析

1. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 7-117 所示的 Contours 操作面板。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-118 所示的速度分布云图。



图7-117　Contours 对话框

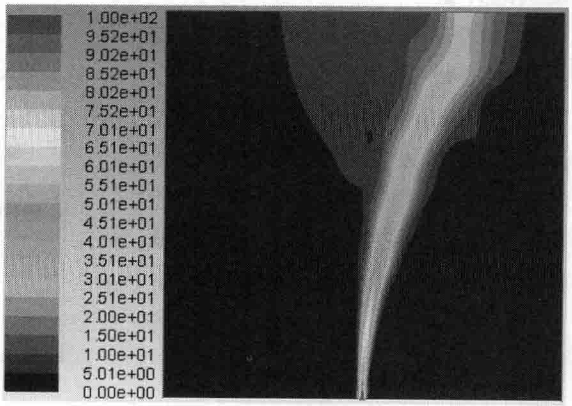


图7-118　速度分布云图

2. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下方的 Species 和 Mass fraction of ch4，单击 Display 按钮，得到图 7-119 所示的甲烷浓度分布云图。

3. 对于甲烷而言，设置 Min 为 0，Max 为 0.03585，单击 Display 按钮，得到图 7-120 所示的甲烷安全区域。

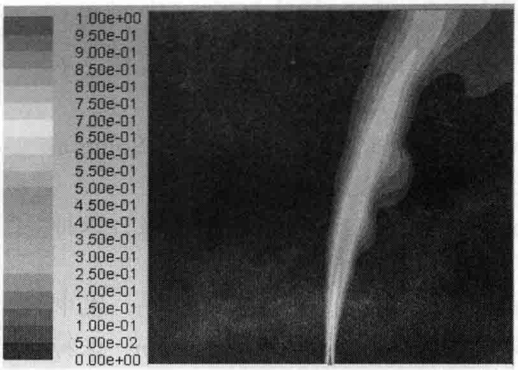


图7-119 甲烷浓度分布云图

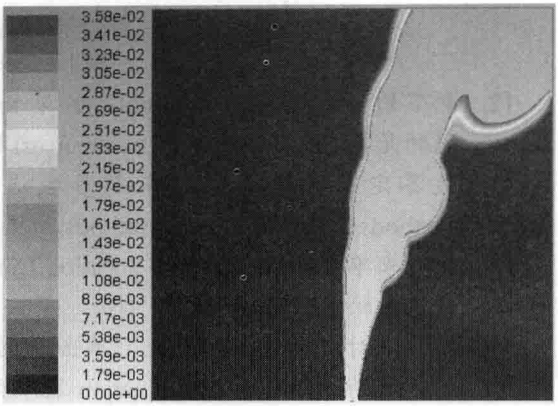


图7-120 甲烷安全区域

4. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（7-5.cas 和 7-5.dat）。

5. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

7.6 热油管道温降分析

7.6.1 案例简介与思路分析

我国所产原油 80%以上为凝点较高的含蜡原油。目前含蜡原油多采用加热管输的方式。在热油管道运行过程中，不可避免地会因计划性或事故性的原因而发生停输。原油管道的停输再启动一直是管道安全运行的核心技术问题。由于热油管道大部分都采用埋地敷设，因此在实际生产、运行中，对停输后热油管道以及土壤温度场分布的研究，具有重要的意义和作用。

【案例简介】

本例的输油管为$\phi 500\times 6$mm 钢管，管中心埋深为 1.5m，管外保温层厚度 10mm，沥青防腐层厚度 6mm。由于涉及与土壤环境的传热问题，需要考虑大地恒温层及管道热力影响区的水平边界来划定土壤区域范围，本例选择土壤垂深 10m，水平方向的热力半径为 10m，如图 7-121 所示。

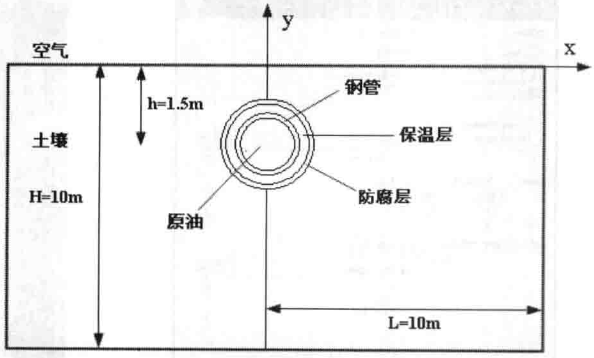


图7-121 管道温降几何示意图

【思路分析】

在模拟的过程中，分别划分出流体区域与固体区域，然后在选择求解器时采用非耦合式隐式算法，打开能量方程。由于存在温度梯度，因此需要编写 UDF 来定义边界温度。整个模拟计算的流程如图 7-122 所示。

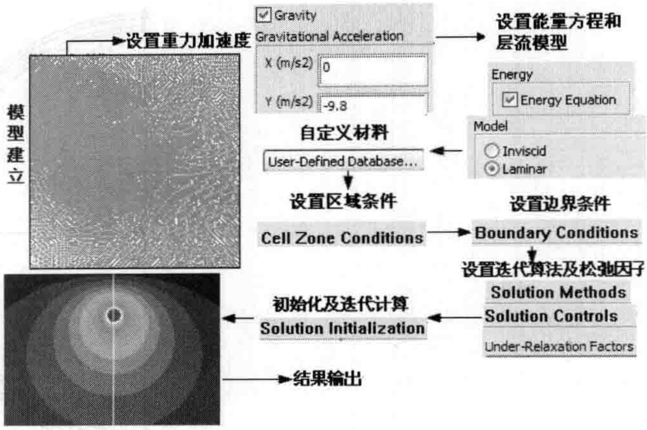


图7-122　热油管道温降分析流程图

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\7-6.msh、7-6.cas、7-6.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch7\7-6.avi”文件。

7.6.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击 → → 按钮，依次创建（0，0，0）、（0.25，0，0）、（0.256，0，0）、（0.266，0，0）、（0.272，0，0）共 5 个点，如图 7-123 所示。



图7-123　创建的点

2. 单击 → → 按钮，打开 Move/Copy Vertices 面板，选中之前创建的除原点外的 4 个点，选择 Copy 选项，在 Operation 选项中选择 Rotate，在旋转角度 Angle 中输入 90，旋转轴 Axis 选项保持默认，即围绕 z 轴旋转，单击 Apply 按钮即可。在旋转角度 Angle 中输入-90，其他选项保持不变，单击 Apply 按钮，得到的点如图 7-124 所示。
3. 单击 → → 按钮，打开 Create Straight Edge 面板，创建点 1（vertix.1）与点 2（vertix.2）、点 1 与点 6、点 6 与点 7、点 7 与点 8、点 8 与点 9、点 1 与点 10、点 10 与点 11、点 11 与点 12、点 12 与点 13 之间的线段，共 9 条线段。右击 按钮，在下拉列表中单击 按钮，打开 Create Circular Arc 面板，在 Center 选项右侧选中点 1，End-Points 选项右侧选中点

2、点 6，保持 Arc 选项为默认，单击 Apply 按钮，即可得到所需弧线。同理，可得以点 1 为 Center，点 3 与点 7、点 4 与点 8、点 5 与点 9、点 2 与点 10、点 3 与点 11、点 4 与点 12、点 5 与点 13 所形成的圆弧，如图 7-125 所示。

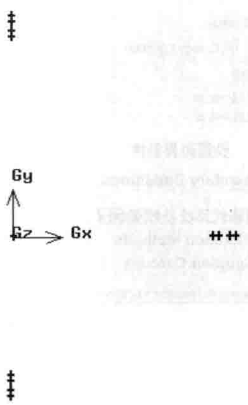


图7-124　旋转复制点

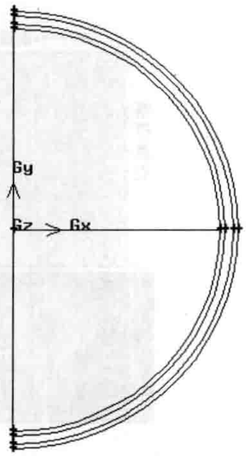


图7-125　创建的圆弧

4. 将线段 2、线段 9、线段 10、线段 11、线段 12 组成一个面，线段 1、线段 7、线段 8、线段 9、线段 10 和线段 3、线段 4、线段 5、线段 11、线段 12 分别组成两个面，单击 → → 按钮，在 Create Face from Wireframe 面板的 Edge 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何面。本例生成的三个面如图 7-126 所示。

5. 单击 → → 按钮，打开 Move/Copy Faces 面板，选中之前创建的 5 个面，选择 Move 选项，在 Operation 选项中选择 Translate，在坐标 Global 的 y 方向右侧输入–1.5，其他选项保持默认，单击 Apply 按钮即可，如图 7-127 所示。

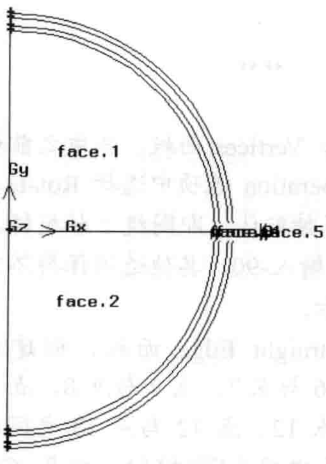


图7-126　生成的面



图7-127　移动后的面

6. 单击 → → 按钮，依次创建（0，0，0）、(10，0，0)、（10，

–10，0）、（0，–10，0）共 4 个点；单击 → → 按钮，打开 Create Straight Edge 面板，创建点 5（vertix.5）与点 14（vertix.14）、点 14 与点 15、点 15 与点 16、点 16 与点 17、点 17 与点 13 之间的线段，共 5 条线段；单击 → → 按钮，在 Create Face from Wireframe 面板的 Edge 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，依次分别为线段 14、线段 19、线段 20、线段 21、线段 22、线段 23、线段 18，单击 Apply 按钮生成几何面，如图 7-128 所示。



图7-128　绘制好的土壤区域

7.6.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 黄色输入栏中选中线段 1、线段 2、线段 6、线段 11、线段 12、线段 13、线段 14、线段 15、线段 16、线段 17、线段 18，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 60，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格；按照同样的方式将线段 3、线段 5、线段 9、线段 7 分为 3 段；将线段 4、线段 8 分为 4 段，划分好的线网格如图 7-129 所示。
2. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的面 1、面 2，运用 Quad 单元和 Tri Primitive 方法对这两个面进行划分，其他设置保持默认即可。选中已经完成线网格划分的面 3、面 4、面 5，运用 Quad 单元和 Map 方法对这三个面进行划分，其他设置保持默认，其生成的面网格如图 7-130 所示。

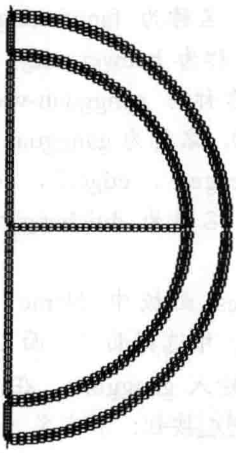


图7-129　创建的线网格

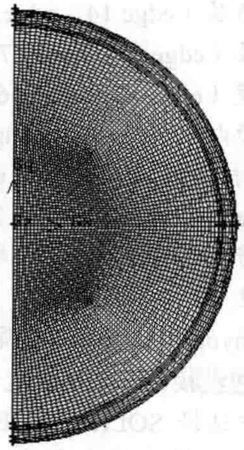


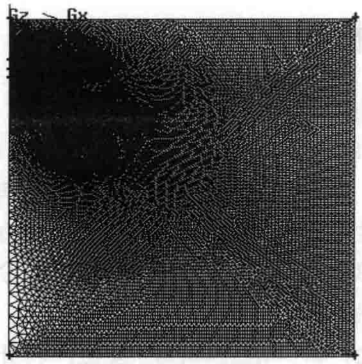
图7-130　管道区域的面网格

3. 单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 黄色输入栏中选中线段 20、线段 22，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 75，单击 Apply 按钮生成土壤区域上下两条边的线网格。按照同样的方

式，将线段 21 分为 80 段。选中线段 19，并使红色箭头方向由上指向下，设置 Ratio 的节点距离比例为 0.95，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 40，单击 Apply 按钮生成土壤区域轴线处管道上方线段的线网格。选中线段 23，并使红色箭头方向由下指向上，设置 Ratio 的节点距离比例为 0.95，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 75，单击 Apply 按钮生成土壤区域轴线处管道下方线段的线网格，如图 7-131 所示。

4. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的面 6，运用 Tri 单元和 Pave 方法对这个面进行划分，其他设置保持默认即可，其生成的面网格如图 7-132 所示。


图7-131　土壤区域的线网格


图7-132　热油管道传热问题的网格

5. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将地面（edge.20）定义为壁面（WALL），名称为 di-biao；将底边（edge.22）定义为壁面（WALL），名称为 di-bian；将右侧边（edge.21）定义为壁面（WALL），名称为 right；将防腐层（edge.14、edge.18）定义为壁面（WALL），名称为 fangfuceng；将保温层（edge.13、edge.17）定义为壁面（WALL），名称为 baowenceng；将钢管外壁（edge.12、edge.16）定义为壁面（WALL），名称为 gangguan-waibi；将钢管内壁（edge.11、edge.15）定义为壁面（WALL），名称为 gangguan-neibi；将对称轴（edge.2、edge.3、edge.4、edge.5、edge.6、edge.7、edge.8、edge.9、edge.19、edge.23）定义为壁面（WALL），名称为 duichengzhou；定义好的边界如图 7-133 所示。

6. 单击 → 按钮，在 Specify Continuum Types 面板中 Name 中输入 yuanyou，在 Type 选项中选择 FLUENT，在 Entity 中选择面 1、面 2，单击 Apply 按钮，完成对这一区域的定义；在 Name 中输入 gangguan，在 Type 选项中选择 SOLID，在 Entity 中选择面 3，单击 Apply 按钮；和定义 gangguan 方法一样，依次定义 new_baowenceng（面 4）、new_fangfuceng（面 5）、turang（面 6），定义好的介质类型如图 7-134 所示。

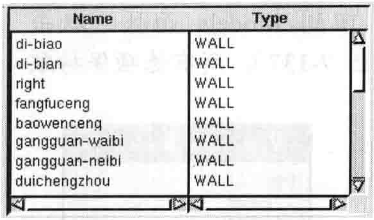


图7-133 定义好的边界类型名称列表

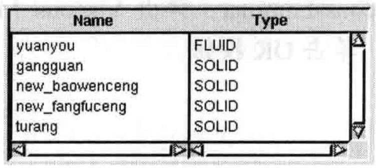


图7-134 定义好的介质类型

7. 选择 File→Save As 命令，将工程文件保存为“7-6”。同时，选择 Export→Mesh 命令，输出网格文件 7-6.msh。

7.6.4 FLUENT 中的求解设置

1. 由于沿土壤方向存在温度梯度，故需要定义 Y 方向上的温度变化规律。本例的程序如下：

```
#include"udf.h"
DEFINE_PROFILE(WALL_youbian,thread,index)
{
face_t f;
real x[ND_ND];
real y;
begin_f_loop(f,thread)
{
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
F_PROFILE(f,thread,index)=273.15+2.2-0.03*y;
}
end_f_loop(f,thread)
}
```

程序编写好后，保存文件名为 d.c，并放至工作目录下。

2. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
3. 选择 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件 7-6.msh。网格读入之后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。
4. 单击 General 控制面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸。
5. 在 General 操作面板的 Solver 下方选中 Gravity，并在 Y(m/s2)中输入–9.8，即考虑在 Y 轴负向存在重力加速度，如图 7-135 所示。
6. 单击 Problem Setup 的 Models，双击 Energy，弹出图 7-136 所示的 Energy 对

话框，选中 Energy Equation，单击 OK 按钮。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框（见图 7-137），所有选项保持默认，单击 OK 按钮。

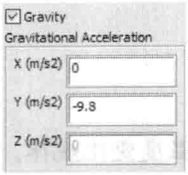


图7-135　设置重力加速度

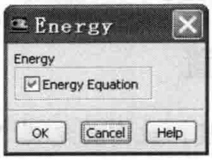


图7-136　选择能量方程

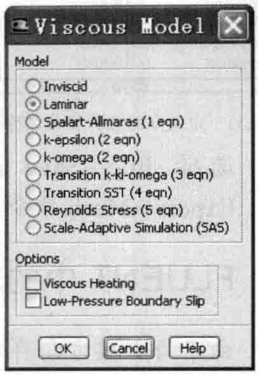


图7-137　Viscous Model 对话框

7. 由于材料库中没有原油这一材料，需要用户自己定义。单击 Create/Edit Materials 对话框右侧的 User-Defined Database... 按钮，弹出图 7-138 所示的 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入"new materials"，然后单击 Browse... 按钮，弹出图 7-139 所示的 User-Defined Database Materials 对话框。在 User-Defined Database Materials 对话框中定义原油的类型为 fluid，名称为 yuanyou，物性参数如图 7-139 所示，单击 Save 和 Copy 按钮，将定义好的原油保存在自定义材料数据库中，并导入到当前工程中进行计算。完成后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。回到 Materials 对话框中，即会发现在 Materials 的 Fluid 下拉列表中存在了空气和原油两种材料。

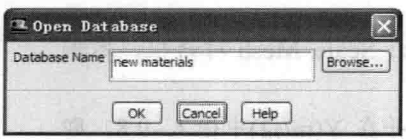


图7-138　Create/Edit Materials 对话框

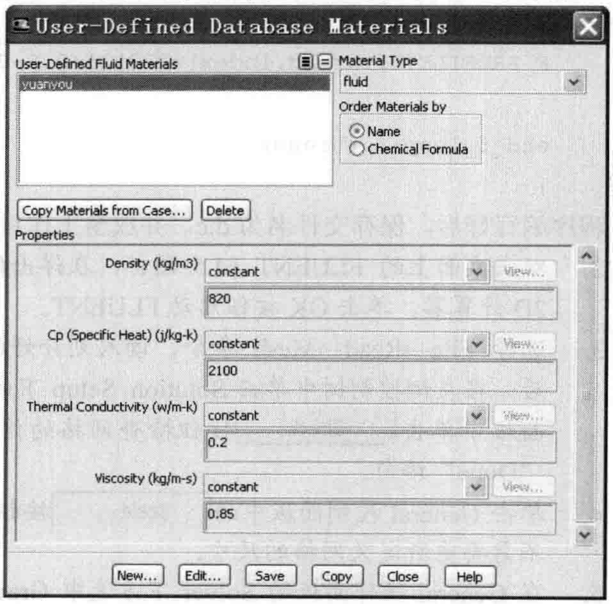


图7-139　User-Defined Database Materials 对话框

8. 接下来定义固体钢管、保温层、防腐层和土壤。单击 Create/Edit Materials 对

话框右侧的 User-Defined Database... 按钮，弹出 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入 new materials，然后单击 Browse... 按钮，弹出 User-Defined Database Materials 对话框。在 User-Defined Database Materials 对话框中分别定义钢管、保温层、防腐层的类型为 solid，名称依次为 gangguan、baowen、fangfu-liqing、turang，物性参数分别如图 7-140、图 7-141、图 7-142 和图 7-143 所示。单击 Save 和 Copy 按钮，将定义好的原油保存在自定义材料数据库中，并导入到当前工程中进行计算。完后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。回到 Materials 对话框中，即会发现在 Materials 的 Fluid 下拉列表中存在了钢管、保温、防腐沥青、土壤和铝 5 种材料。

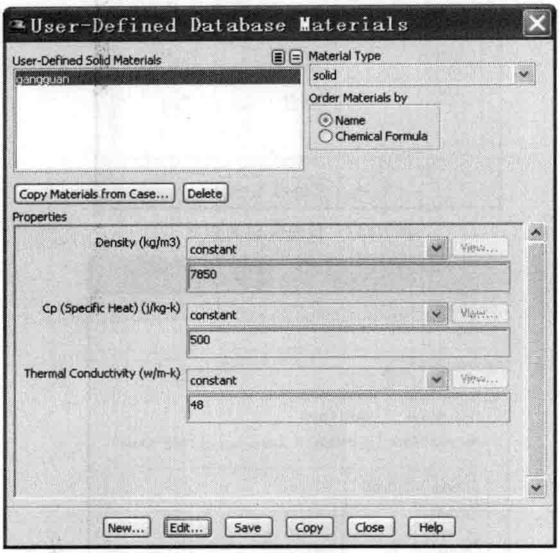


图7-140　钢管层的定义

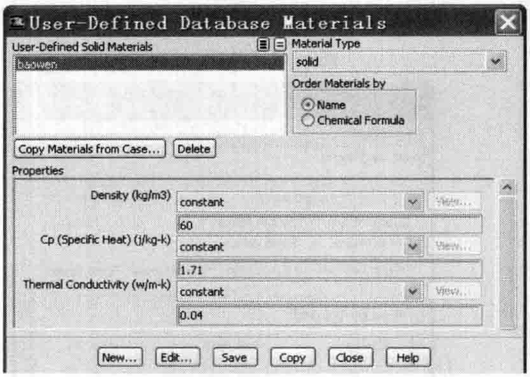


图7-141　保温层的定义

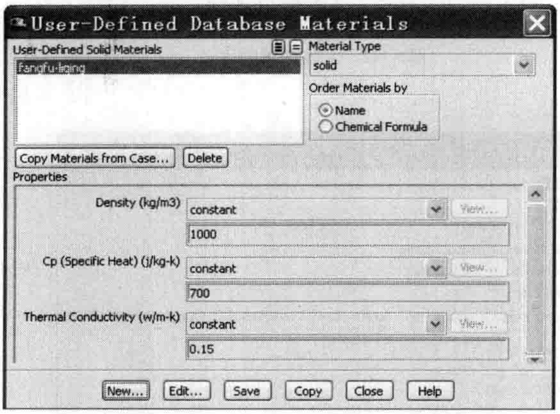


图7-142　防腐沥青层的定义

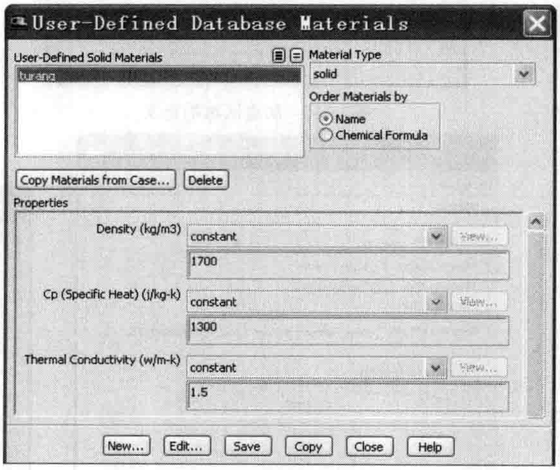


图7-143　土壤层的定义

9. 打开 Cell Zone Conditions 面板，双击 Zone 区域的 gangguan，弹出 Solid 对话框，在 Material Name 右侧的下拉列表中选择 gangguan，其他设置保持默认，

单击 OK 按钮，完成对钢管区域的定义，如图 7-144 所示。其他保温层、防腐沥青层、土壤层的设置相同，如图 7-145、图 7-146、图 7-147 所示。在温降计算前，我们需要得到土壤的初始温度场。这里先把原油当作热源向外散热，因而先假定原油的温度是不变的，赋予它初始的温度，具体设置如图 7-148、图 7-149 所示。

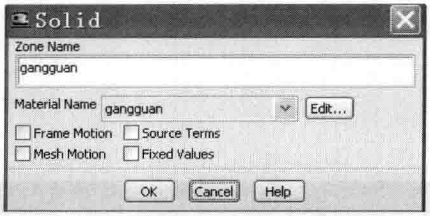


图7-144 钢管区域的定义

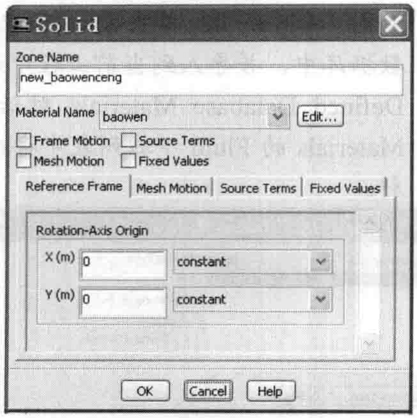


图7-145 保温区域的定义

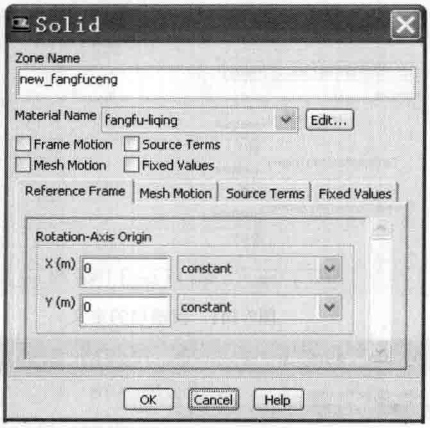


图7-146 防腐区域的定义

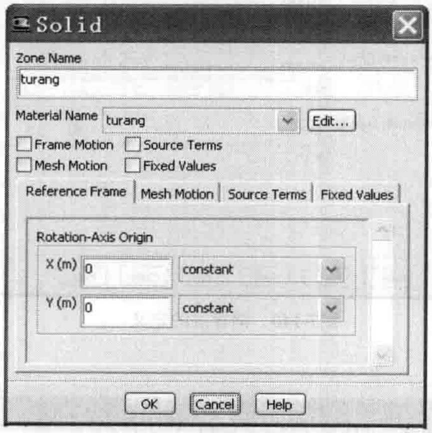


图7-147 土壤区域的定义

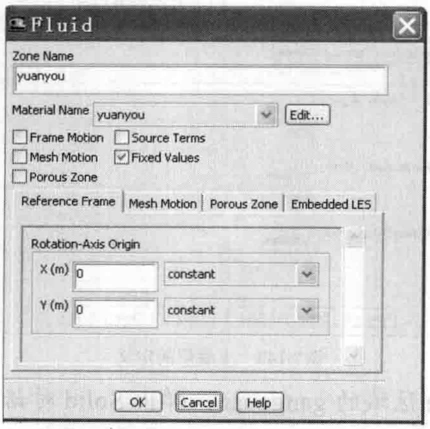


图7-148 Fluid 对话框

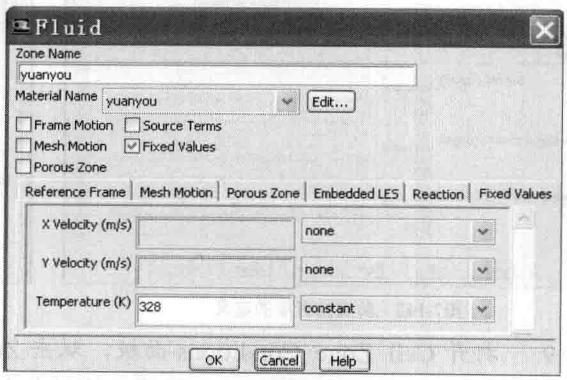


图7-149 原油区域的定义

10. 选择 Define→User-Defined→Functions→Interpreted 命令，弹出图 7-150 所示的对话框，单击对话框右侧的 Browse... 按钮，选择之前保存到目录文件下的 d.c 文件，单击 OK 按钮。可以看到 Interpreted UDFs 中已经出现编译好的文件，为了可以看到汇编程序，我们可以选中 Display Assembly Listing，单击 Interpret 按钮，完成 UDF 程序的导入。

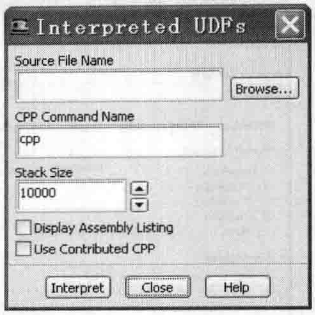


图7-150 Interpreted UDFs 对话框

11. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 gangguan-neibi，保持下方 Phase 中选择 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Wall 对话框，其具体设置如图 7-151 所示。gangguan-waibi、baowenceng、fangfuceng、di-bian、di-biao 的设置如图 7-152～图 7-156 所示。下来我们主要说一下 right 的设置，其他设置步骤与上面一样，在 Wall 对话框的 Temperature 右侧框的下拉列表中选中我们自己编写的壁面条件（见图 7-157），单击 OK 按钮。

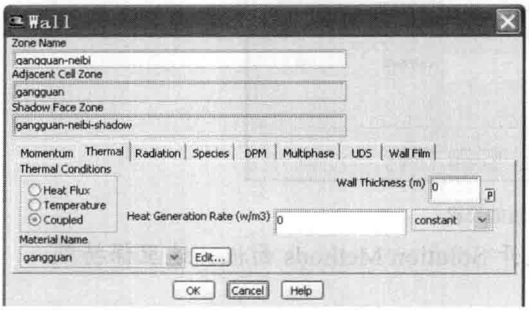


图7-151 钢管内壁的设置

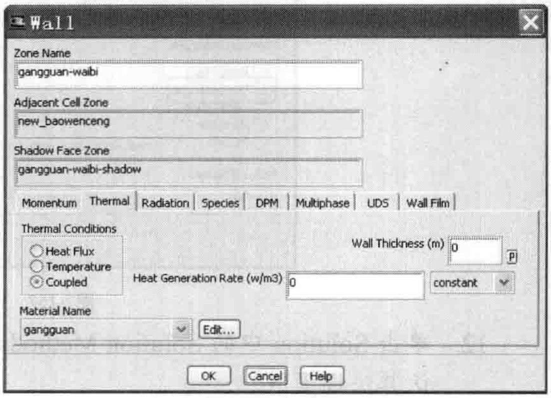


图7-152 钢管外壁的设置

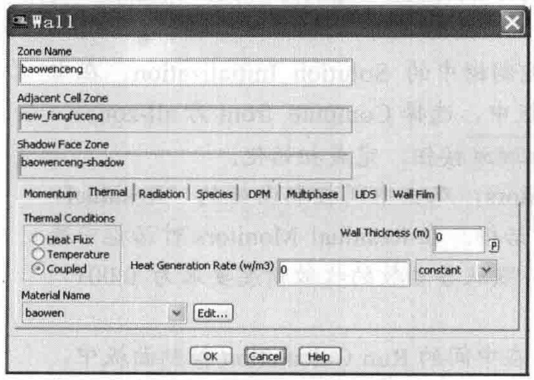


图7-153 保温层的设置

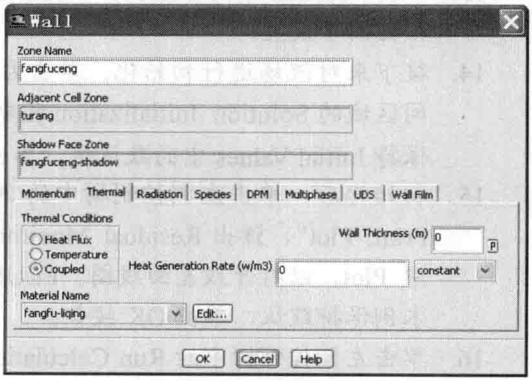


图7-154 防腐层的设置

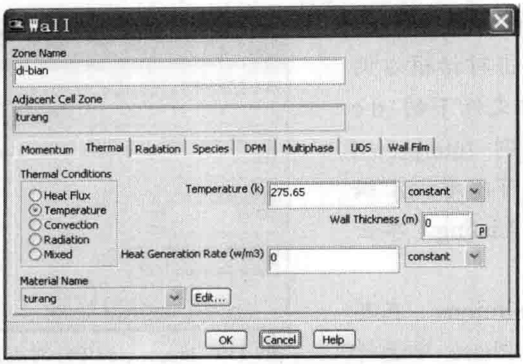


图7-155　底边的设置

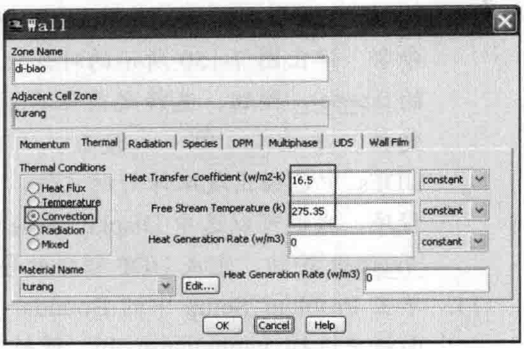


图7-156　地表的设置

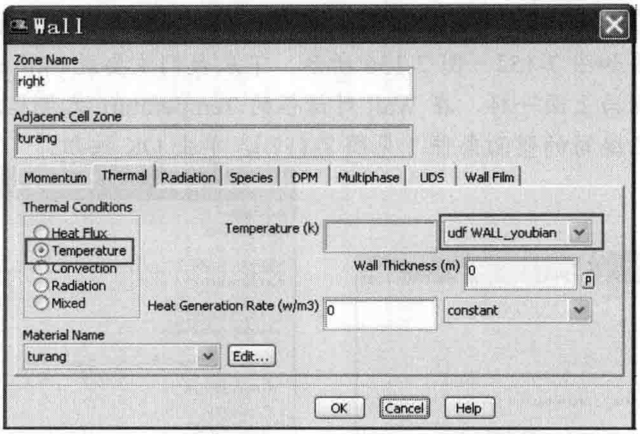


图7-157　土壤右边的设置

12. 单击 Solution 中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认算法设置。

13. 单击 Solution 中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

14. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 all-zones，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

15. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的"Residuals-Print, Plot"，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。

16. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 500 步，单击 Calculate 按钮开始解算。

17. 计算收敛后，接下来再进行非稳态运算。在 General 面板的 Solver 选项卡中选中非稳态运算（Transient），如图 7-158 所示；打开 Cell Zone Conditions 面板，双击 Zone 区域的 yuanyou，弹出 Fluid 对话框，取消选中 Fixed Values，

其他设置保持默认，单击 OK 按钮。

18. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Time Step Size（s）为 0.1，设置 Number of Time Steps（迭代步）为 36000 步，如图 7-159 所示，单击 Calculate 按钮开始解算。

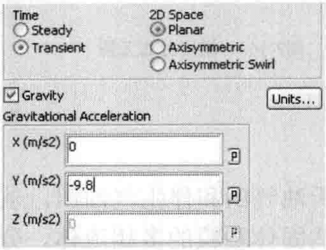


图7-158 Solver 选项卡

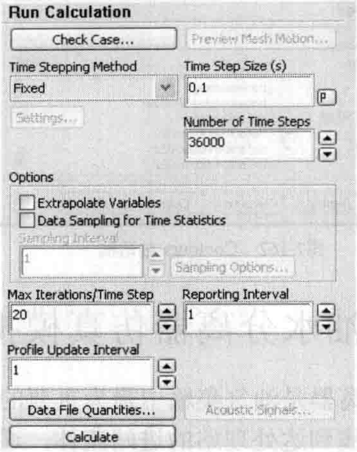


图7-159 Run Calculation 控制面板

7.6.5 结果后处理与分析

1. 为了显示整个图形，选择 Display→Views 命令，弹出 Views 对话框，如图 7-160 所示。选择 Mirror Planes 下的 duichengzhou，单击 Apply 按钮，即可显示整个图形，如图 7-161 所示。

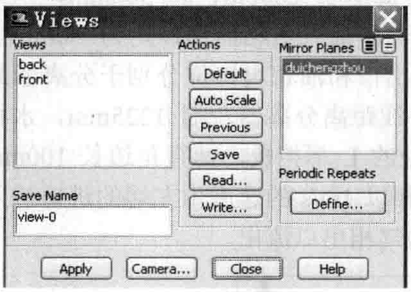


图7-160 Views 对话框

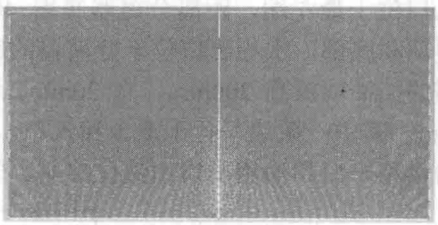


图7-161 整个网格

2. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 7-162 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Temperature，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-163 所示的温度分布云图。
3. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（7-6.cas 和 7-6.dat）。
4. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

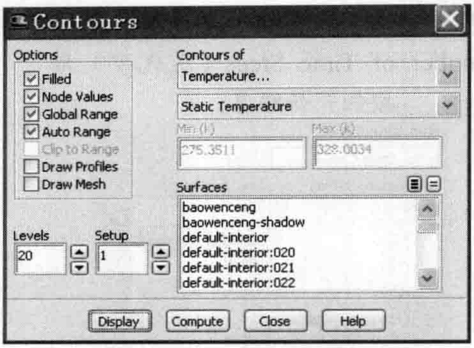


图7-162　Contours 对话框

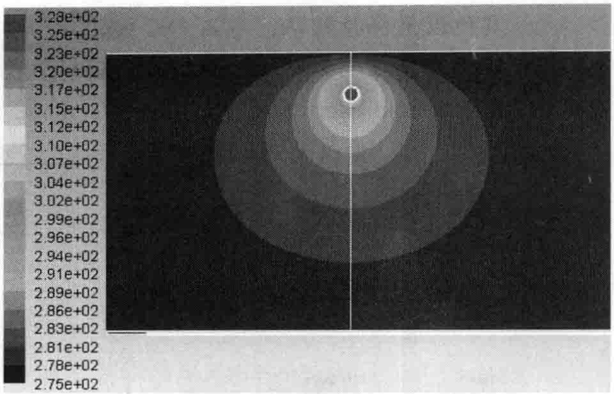


图7-163　温度分布云图

7.7　油水分离器仿真模拟

分离器是油气集输中最为重要的工艺设备，对于凝析油气田和伴生气油田，从井口通过集输管线到达处理站的进站流体，通常为油气水以及一些固体颗粒的多相流体。分离器分离效果的好坏，对油气加工处理、管线的正常运作至关重要。本节将介绍如何使用 FLUENT 多相流模型对陆地油田最常用的卧式三相分离器进行模拟。

7.7.1　案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 7-164 所示为本例的油气水三相分离器，分离器长 2000m、高 500mm，两端为圆弧封口，其曲率半径为 500mm。分离器混合相的进口和油气水相的出口均为 50mm，混合相入口位于最左端，距离分离器底端 400mm，气相出口和油相出口位分别于分离器最右端的顶部和底部，水相出口位于分离器的底部，其中心线距离分离器左端 1225mm，水相出口右侧的挡油堰板高 200mm，宽 20mm。分离器入口处的 L 形挡板，两直角边长 100mm、厚 20mm，其中一条边平行于混合相入口。油气水混合相以 1m/s 的速度由左端的进口进入，底部的水相出口和油相出口由液位控制，气相由顶部的气相出口流出。

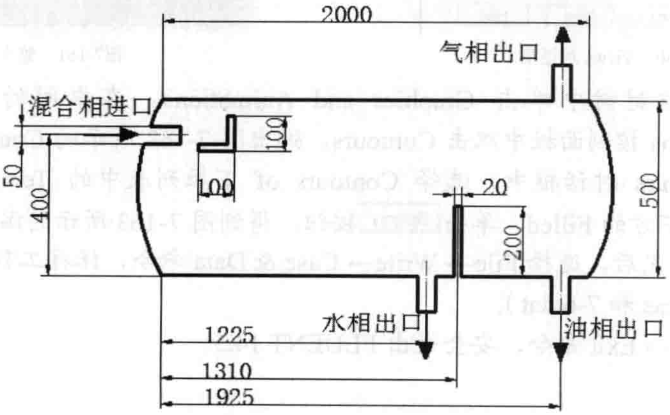


图7-164　分离器的尺寸示意图

【思路分析】

本例为二维的油气水三相流动模拟，首先要建立二维平面模型，可由 ANSYS 自带的 DM 模块建立，在 ANSYS 自带的 Meshing 模块中进行网格划分，然后在 FLUENT 中调用多相流模型。这里我们选择 VOF 模型，读者有兴趣可以尝试用混合模型进行模拟。本例为一个非定常问题，读者可以观测到油气水三相在分离器中的流动过程，以及分离器内部的液面变化过程及对分离效果的影响。整个流程如图 7-165 所示。

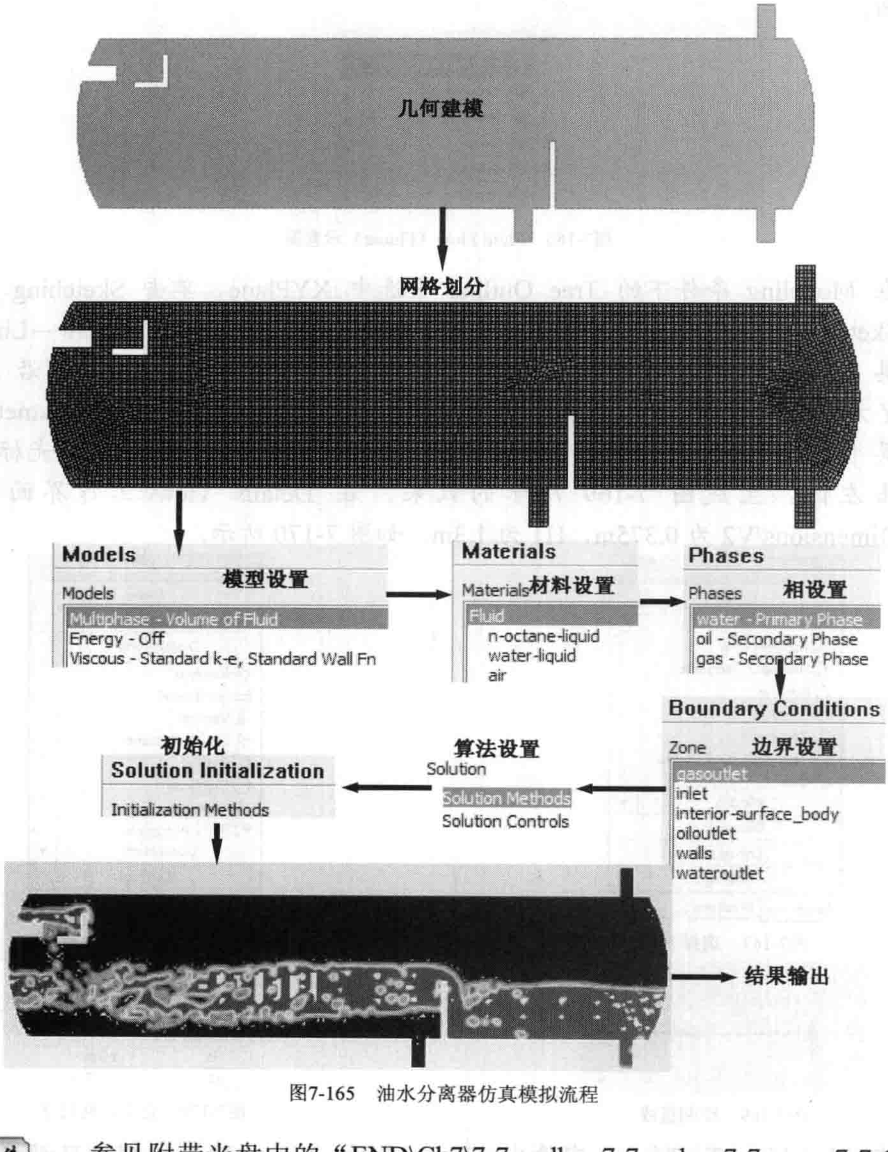


图7-165　油水分离器仿真模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\7-7.agdb、7-7.msh、7-7.cas、7-7-1000.dat、7-7-2000.dat、7-7-3000.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch7\7-7.avi”文件。

7.7.2 几何建模

1. 双击 Workbench 14.5 图标，进入 Workbench 14.5 的工作环境，在 Workbench 14.5 的工具箱 Toolbox→Analysis Systems 中，双击 Fluid Flow（Fluent）或直接拖入项目视图区 Project Schematic，生成项目 A。如图 7-166 所示，双击项目 A 中的 Geometry，选择单位标准为 m，单击 OK 按钮，进入 DM 工作界面。

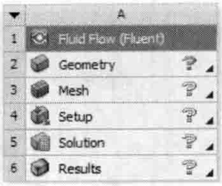


图7-166 Fluid Flow（Fluent）示意图

2. 在 Modeling 条件下的 Tree Outline 中选中 XYPlane，单击 Sketching 进入 Sketching Toolboxes 工作界面。在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Line 工具（见图 7-167），在绘图区单击坐标原点，以坐标原点为起点，分别沿 X 和 Y 方向绘制一条直线；在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具（见图 7-168），在绘图区单击线段，向线段的垂直方向移动鼠标光标，单击左键，生成图 7-169 所示的效果。在 Details View 工作界面设置 Dimensions/V2 为 0.375m，H1 为 1.3m，如图 7-170 所示。

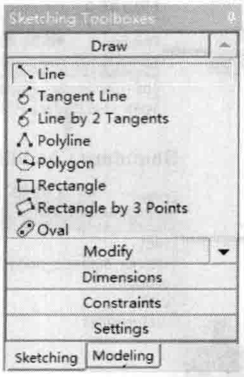


图7-167 选择 Line

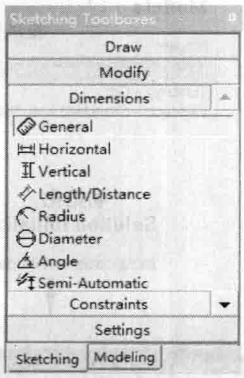


图7-168 选择 General

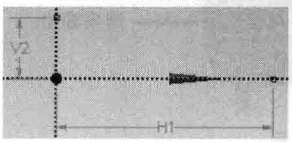


图7-169 绘制直线

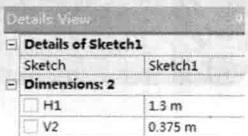


图7-170 定义几何尺寸

3. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Line 工具，绘制水相出口部分，在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具，单击 General 工具对所绘制的线段进行几何约束，如图 7-171 所示。设置线段的长度，在 Details View 工作界面设置 Dimensions/V3 为 0.1m，H4 为 0.05m，如图 7-172 所示。

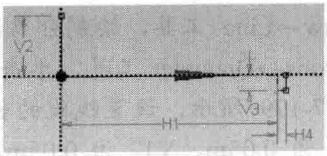
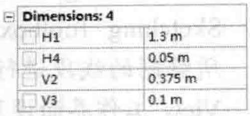


图7-171　绘制水相出口



Dimensions: 4	
H1	1.3 m
H4	0.05 m
V2	0.375 m
V3	0.1 m

图7-172　定义几何尺寸

4. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Line 工具，绘制挡板部分，在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具，单击 General 工具对所绘制的线段进行几何约束，如图 7-173 所示。设置线段的长度，在 Details View 工作界面设置 Dimensions/H5 为 0.05m，H7 为 0.02m，V6 为 0.2m，如图 7-174 所示。

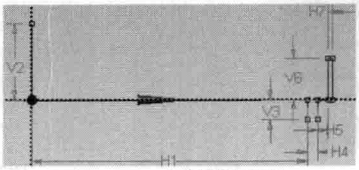
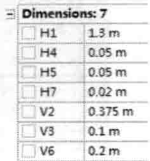


图7-173　绘制挡油堰板



Dimensions: 7	
H1	1.3 m
H4	0.05 m
H5	0.05 m
H7	0.02 m
V2	0.375 m
V3	0.1 m
V6	0.2 m

图7-174　定义几何尺寸

5. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Line 工具，绘制油相出口部分和右侧的边界，在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具，单击 General 工具对所绘制的线段进行几何约束，如图 7-175 所示。设置线段的长度，在 Details View 工作界面设置 Dimensions/H8 为 0.48m，V9 为 0.1m，H10 为 0.05m，H11 为 0.05m，V12 为 0.5m，如图 7-176 所示。

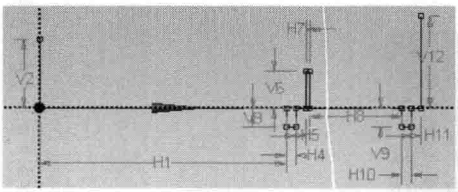
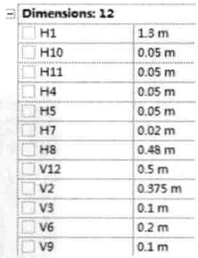


图7-175　绘制油相出口及右侧边界



Dimensions: 12	
H1	1.3 m
H10	0.05 m
H11	0.05 m
H4	0.05 m
H5	0.05 m
H7	0.02 m
H8	0.48 m
V12	0.5 m
V2	0.375 m
V3	0.1 m
V6	0.2 m
V9	0.1 m

图7-176　定义几何尺寸

6. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Line 工具，绘制气相出口和分离器上边缘部分，在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具，单击 General 工具对所绘制的线段进行几何约束，如图 7-177 所示。设置线段的长度，在 Details View 工作界面设置 Dimensions/H13 为 0.05m，V14 为 0.1m，H15 为 0.05m，如图 7-178 所示。

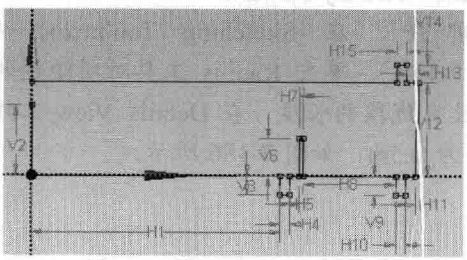


图7-177　绘制气相出口及上边缘



Dimensions: 15	
H1	1.3 m
H10	0.05 m
H11	0.05 m
H13	0.05 m
H15	0.05 m
H4	0.05 m
H5	0.05 m
H7	0.02 m
H8	0.48 m
V12	0.5 m
V14	0.1 m
V2	0.375 m
V3	0.1 m
V6	0.2 m
V9	0.1 m

图7-178　定义几何尺寸

7. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Line 工具，绘制分离器入口部分，在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具，单击 General 工具对所绘制的线段进行几何约束，如图 7-179 所示。设置线段的长度，在 Details View 工作界面设置 Dimensions/H16 为 0.05m，V17 为 0.05m，如图 7-180 所示。

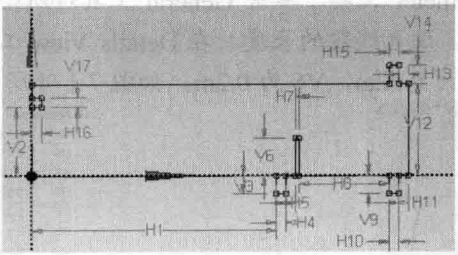


图7-179　绘制分离器入口

Dimensions: 17	
H1	1.3 m
H10	0.05 m
H11	0.05 m
H13	0.05 m
H15	0.05 m
H16	0.05 m
H4	0.05 m
H5	0.05 m
H7	0.02 m
H8	0.48 m
V12	0.5 m
V14	0.1 m
V17	0.05 m

图7-180　定义几何尺寸

8. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Line 工具，绘制分离器入口的 L 形挡板部分，在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具，单击 General 工具对所绘制的线段进行几何约束，如图 7-181 所示。设置线段的长度，在 Details View 工作界面设置 Dimensions/H18 为 0.05m，V19 为 0.02m，H20 为 0.1，V21 为 0.1m，H22 为 0.02m，如图 7-182 所示。

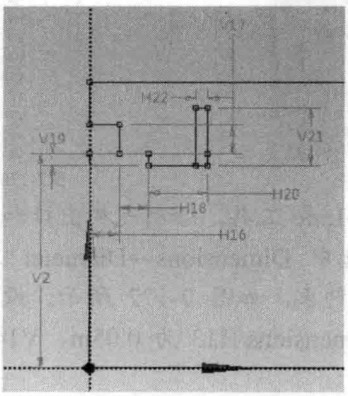


图7-181　绘制入口 L 形挡板

Dimensions: 22	
H1	1.3 m
H10	0.05 m
H11	0.05 m
H13	0.05 m
H15	0.05 m
H16	0.05 m
H18	0.05 m
H20	0.1 m
H22	0.02 m
H4	0.05 m
H5	0.05 m
H7	0.02 m
H8	0.48 m
V12	0.5 m
V14	0.1 m
V17	0.05 m
V19	0.02 m
V2	0.375 m
V21	0.1 m
V3	0.1 m
V6	0.2 m
V9	0.1 m

图7-182　定义几何尺寸

9. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Draw→Arc By 3 Points 工具，如图 7-183 所示，绘制分离器两端的圆弧部分，在 Sketching Toolboxes 中选中 Dimensions→Diameter 工具（图 7-184），单击 Radius 工具对所绘制的线段进行几何约束，如图 7-185 所示。设置线段的长度，在 Details View 工作界面设置 Dimensions/R23 为 0.5m，R24 为 0.5m，如图 7-186 所示。

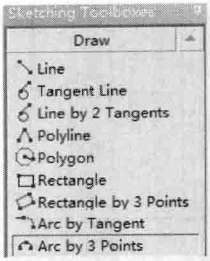


图7-183　选择 Arc By 3 Points

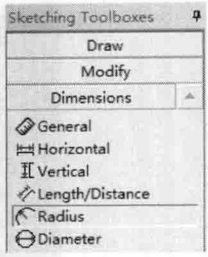


图7-184　选择 Radius

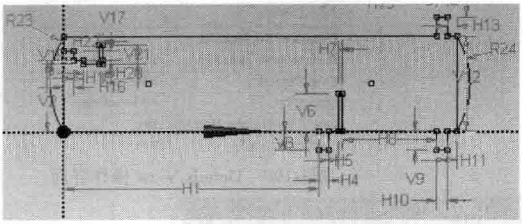
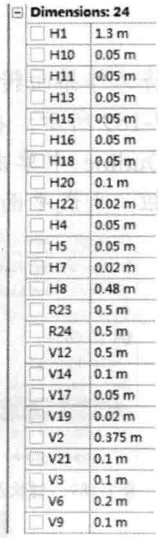


图7-185　绘制分离器两端的圆弧



Dimensions: 24	
H1	1.3 m
H10	0.05 m
H11	0.05 m
H13	0.05 m
H15	0.05 m
H16	0.05 m
H18	0.05 m
H20	0.1 m
H22	0.02 m
H4	0.05 m
H5	0.05 m
H7	0.02 m
H8	0.48 m
R23	0.5 m
R24	0.5 m
V12	0.5 m
V14	0.1 m
V17	0.05 m
V19	0.02 m
V2	0.375 m
V21	0.1 m
V3	0.1 m
V6	0.2 m
V9	0.1 m

图7-186　定义几何尺寸

10. 删除多余的线段。在 Sketching Toolboxes 中选中 Modify→Trim 工具，单击连接进口和 L 形挡板的线段以及两边垂直的线段，如图 7-187 所示。

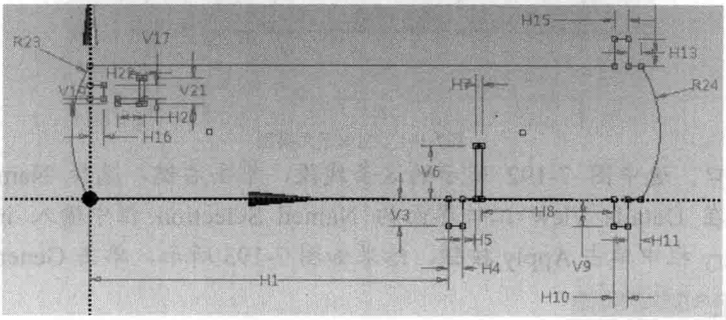


图7-187　删除多余线段

11. 在 Sketching Toolboxes 中选中 Modify→Extend 工具，单击进口的两个线段，自动延伸到左侧的圆弧段，在 Sketching Toolboxes 中选中 Modify→Trim 工具，删除这两个线段之间的圆弧，如图 7-188 所示。

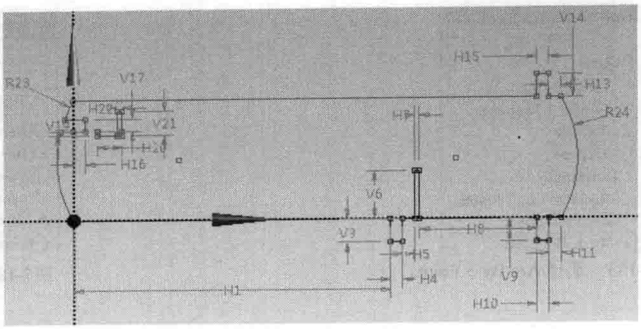


图7-188　延长及删除线段

12. 将工作界面转至 Modeling，选择 Concept→Surface From Sketches 命令，如图 7-189 所示；在 Details View 工作界面中，Base Objects 选择 1 Sketch（在 Tree Outline 中单击选中），如图 7-190 所示，单击 Apply 按钮；单击 Generate 按钮，生成平面模型，如图 7-191 所示。

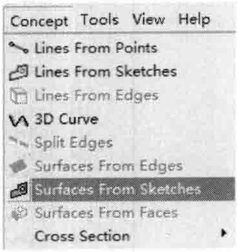
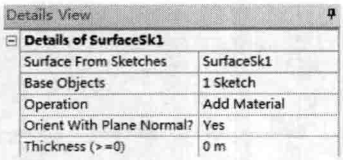


图7-189　延长及删除线段



Details View	
Details of SurfaceSk1	
Surface From Sketches	SurfaceSk1
Base Objects	1 Sketch
Operation	Add Material
Orient With Plane Normal?	Yes
Thickness (>=0)	0 m

图7-190　Details View 操作界面

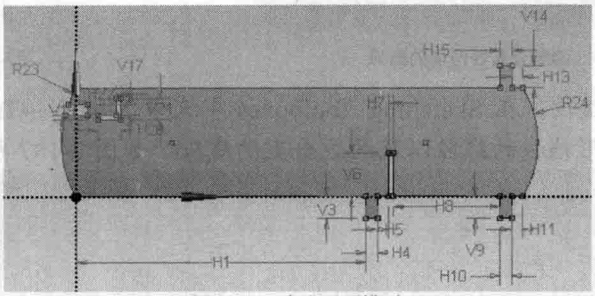


图7-191　生成平面模型

13. 命名进口。选中图 7-192 所示的这条线段，单击右键，选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 inlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 7-193 所示，单击 Generate 按钮。

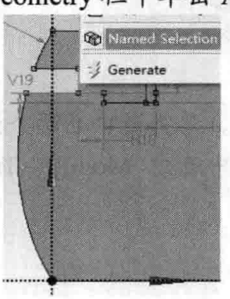
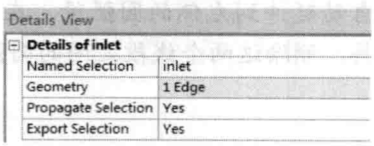


图7-192　定义入口名称



Details View	
Details of inlet	
Named Selection	inlet
Geometry	1 Edge
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes

图7-193　Details View 工作界面

14. 命名水相出口。选中图 7-194 所示的这条线段，单击右键，选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 wateroutlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 7-195 所示，单击 Generate 按钮。

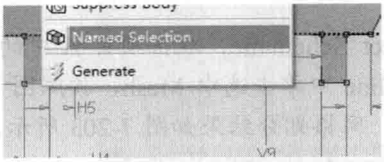


图7-194　命名水相出口

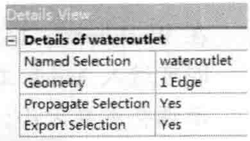


图7-195　Details View 工作界面

15. 命名油相出口。选中图 7-196 所示的这条线段，单击右键，选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 oiloutlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 7-197 所示，单击 Generate 按钮。

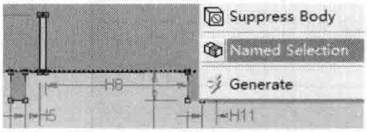


图7-196　命名油相出口

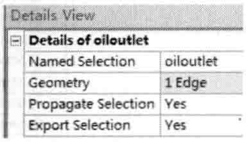


图7-197　Details View 工作界面

16. 命名气相出口。选中图 7-198 所示的这条线段，单击右键，选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 gasoutlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 7-199 所示，单击 Generate 按钮。

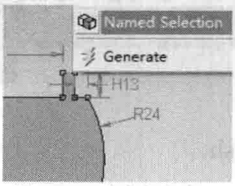


图7-198　命名气相出口

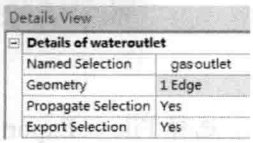


图7-199　Details View 工作界面

17. 命名壁面。选中其他的所有线段（见图 7-200），共计 26 条，单击右键，选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 walls，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 7-201 所示，单击 Generate 按钮。

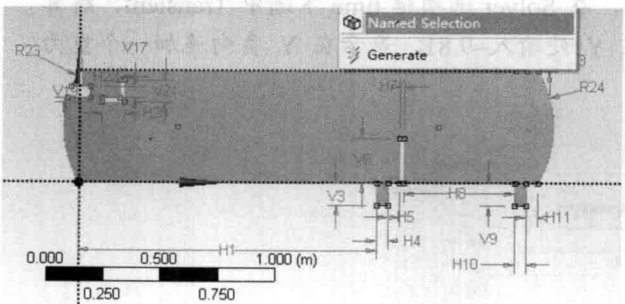


图7-200　命名壁面

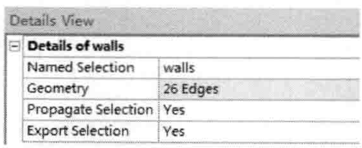
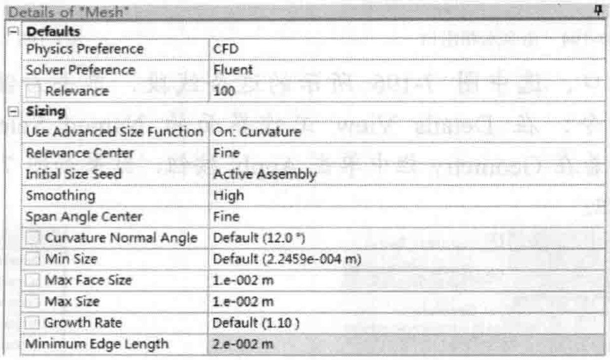


图7-201　Details View 操作界面

18. 输出几何文件，选择 File→Export 命令，保存几何文件 7-7.agdb；选择 File→Exit 命令，安全退出。

7.7.3 网格划分

1. 在 Workbench 14.5 的项目视图区 Project Schematic，双击项目 A 中的 Mesh，即可进入 Mesh 工作界面，并在其 Outline 中单击选中 Mesh，按照图 7-202 所示调整参数大小；单击 Generate Mesh，网格划分结果如图 7-203 所示。


Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	100
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (12.0 °)
Min Size	Default (2.2459e-004 m)
Max Face Size	1.e-002 m
Max Size	1.e-002 m
Growth Rate	Default (1.10)
Minimum Edge Length	2.e-002 m

图7-202 Details of "Mesh"工作界面

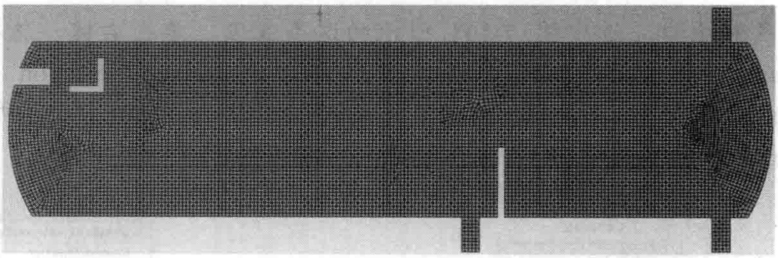


图7-203 网格划分结果

2. 选择 File→ Export 命令，保存网格文件 7-7.msh。

7.7.4 FLUENT 中的求解设置

1. 在 Workbench 14.5 的项目视图区 Project Schematic 中，双击 Setup，出现 FLUENT Launcher 面板，单击 OK 按钮，进入模型计算设置的工作界面。
2. 设置 General。如图 7-204 所示，在 Solver 选项框 time 下选中 Transient，解算非稳态问题，选中 Gravity，在 Y 处输入–9.81，表示在 Y 负向施加一个重力加速度，大小为 $9.81m^2/s$。

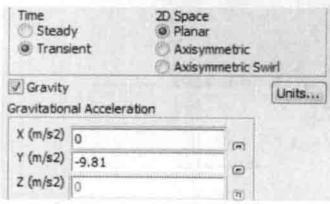


图7-204 General 工作界面

3. 设置 Models。单击 Models，双击打开多相流模型；弹出 Multiphase Model 对话框，在 Model 中选中 VOF 模型，设置相数为 3（见图 7-205），单击 OK 按钮。

4. 双击 Viscous-Laminar，出现 Viscous Model 对话框，在该对话框中选中标准 k-ε 模型（见图 7-206），单击 OK 按钮。

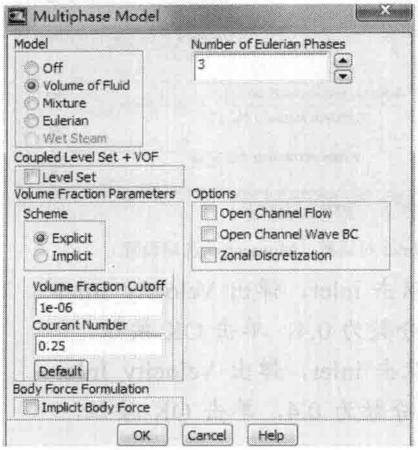


图7-205　Multiphase Model 对话框

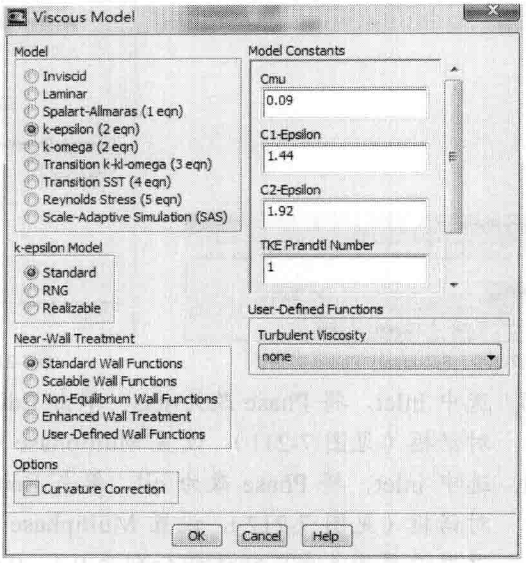


图7-206　Viscous Model 对话框

5. 设置 Materials。单击 Materials，选中 Fluid，单击 Edit 按钮，弹出 Create/Edit Material 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，出现 Fluent Database Materials 对话框，在该对话框中选中 water-liquid(h2o<1>)，依次单击 Copy 和 Close 按钮。采用同样的操作，导入材料正辛烷 n-octane-liquid。

6. 设置 Phase。选中 phase-1-Primary Phase，单击 Edit 按钮，弹出 Primary Phase 对话框（见图 7-207），将 Name 设置为 water，Phase Material 选为 water-liquid，单击 OK 按钮。

7. 在 Phase 中选中 phase-2-Secondary Phase，单击 Edit 按钮，弹出 Secondary Phase 对话框（见图 7-208），N 将 ame 设置为 oil，Phase Material 选为 n-octane-liquid，这里以密度为 720kg/m^3 的正辛烷作为油相，以便于观测到油水分离过程，单击 OK 按钮。

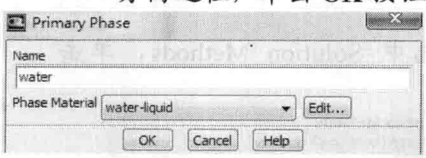


图7-207　Primary Phase 对话框

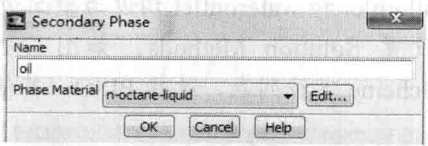


图7-208　Secondary Phase 对话框

8. 在 Phase 中选中 phase-3-Secondary Phase，单击 Edit 按钮，弹出 Secondary Phase 对话框（见图 7-209），将 Name 设置为 gas，Phase Material 选为 air，单击 OK 按钮。

9. 设置 Boundary Conditions。选中 inlet，将进口设置为速度进口，Phase 为

mixture，单击 Edit 按钮或双击 inlet，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置进口速度为 1，Turbulent Intensity 为 1，Hydraulic Diameter 为 0.05（见图 7-210），单击 OK 按钮。

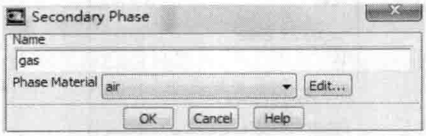


图7-209　Secondary Phase 对话框

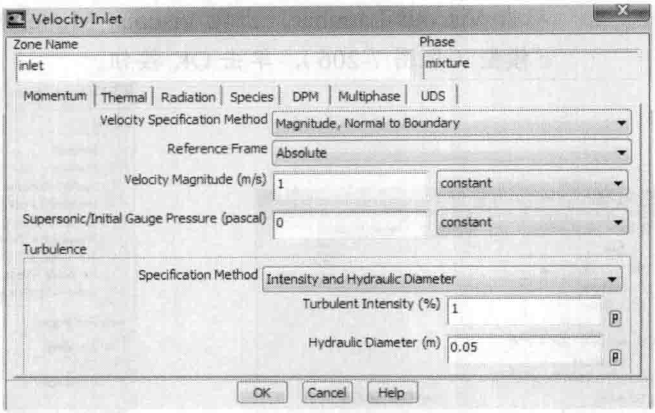


图7-210　Velocity Inlet 对话框（Momenton 选项设置）

10. 选中 inlet，将 Phase 改为 gas，单击 Edit 按钮或双击 inlet，弹出 Velocity Inlet 对话框（见图 7-211），设置 Multiphase 中的体积分数为 0.4，单击 OK 按钮。
11. 选中 inlet，将 Phase 改为 oil，单击 Edit 按钮或双击 inlet，弹出 Velocity Inlet 对话框（见图 7-212），设置 Multiphase 中的体积分数为 0.4，单击 OK 按钮，这里设置油气水三相体积分别为 0.4、0.4 和 0.2。

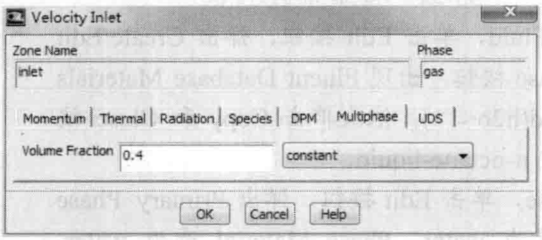


图7-211　Velocity Inlet 对话框（Multiphase 选项设置）

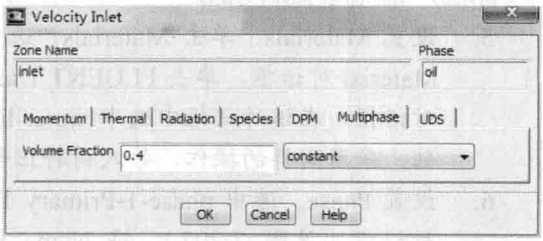


图7-212　Velocity Inlet 对话框（Multiphase 选项设置）

12. 选中 gasoutlet，进口设置为压力出口，Phase 为 mixture，Type 为 outflow 单击 Edit 按钮或双击 gasoutlet，弹出 Outflow 对话框（见图 7-213），设置 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。
13. 油气水三相分离器底部的水相出口和油相出口是由液位控制的，这里将 oiloutlet 和 wateroutlet 均设为壁面边界。
14. 设置 Solution Methods。如图 7-214 所示，选中 Solution Methods，单击 Scheme 下拉列表，选择 PISO，其他值默认。

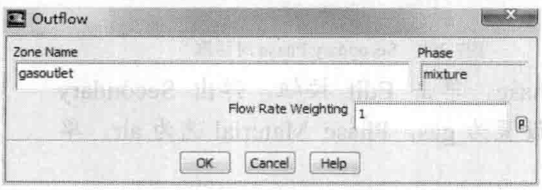


图7-213　Outflow 对话框

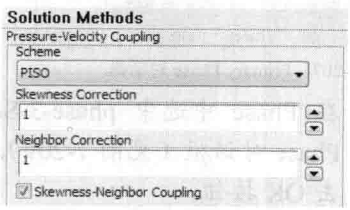


图7-214　Solution Methods 面板

15. 单击 Solution Initialization，初始化方法选用 Standard Initialization，将 Compute from 设置为 all-zones，单击 Initialize 按钮。

16. 在 Solution Initialization 中，单击 Patch，弹出 Patch 对话框，在 Phase 下拉列表中选择 gas，Variable 中选择 Volume Fraction，在 Value 中输入数值 1，在 Zones to Patch 中选择 surface_body（见图 7-215），单击 Patch 按钮。同样，在 Phase 下拉列表中选择 oil，Variable 中选择 Volume Fraction，在 Value 中输入数值 0，在 Zones to Patch 中选择 surface_body（见图 7-216），单击 Patch 按钮。

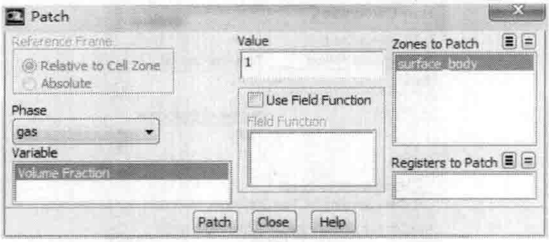


图7-215　Patch 对话框

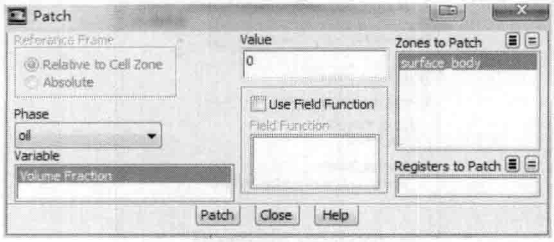


图7-216　Patch 对话框

17. 下面设置本例的动画，以观测油气水三相在分离器内的流动情况。单击 Calculation Activeties，单击最下方 Solution Animations 下方的 Create/Edit 按钮，弹出 Solution Animation 对话框，在 Animation Sequences 后面的文本框内输入 3，在 Active Name 下面的第一个文本框内输入 gas，将 Every 调为 10，When 调为 Time Step（见图 7-217），单击 Define 按钮，对气相体积分数动画进行详细设置。

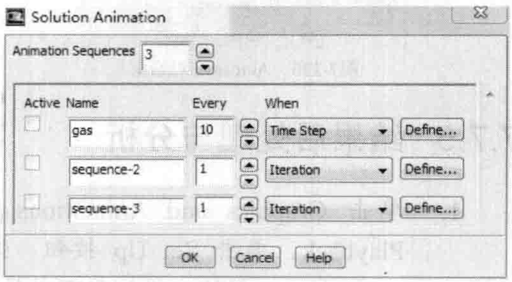


图7-217　Solution Animations 面板

18. 在弹出的 Animation Sequence 对话框中，在 Window 后面的文本框中输入 2，单击右边的 Set 按钮，在右边 Display Type 选项框中选择 Contours，如图 7-218 所示。弹出 Contours 对话框，在 Options 中选中 Filled，同时取消选中 Auto Range，在右方的 Min 和 Max 下的文本框中分别输入 0 和 1，在 Contours of 下拉列表中选择 Phases，在 Phase 下拉列表中选择 gas，如图 7-219 所示，单击 Display 按钮，用同样的方法设置水相和油相的动画。

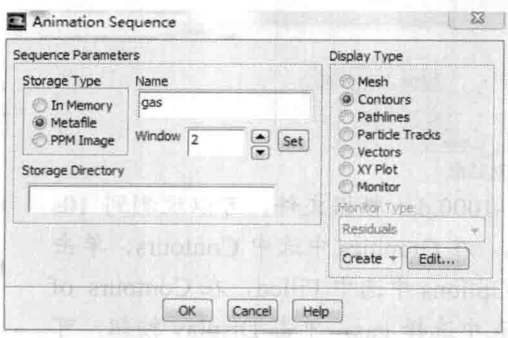


图7-218　Animation Sequence 对话框

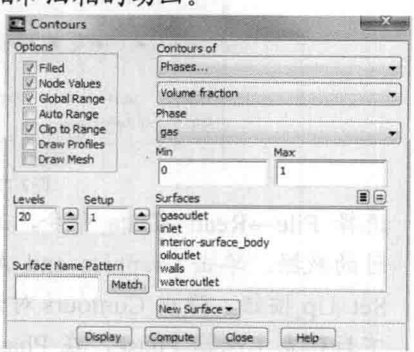


图7-219　Contours 对话框

19. 设置数据文件自动保存。选择 File→Write→Autosave 命令，弹出 Autosave 对话框，在 Save Data File Every(Time Steps)后面的文本框中输入 1000，即每 1000 个时间步保存一个 Data 文件，如图 7-220 所示，在 File Name 下面的文本框中输入保存路径，单击 OK 按钮。
20. 设置 Run Calculation。输入 Time Step Size 为 0.01s，Number of Time Steps 为 1000，Max Iteration/Time Step 为 20，如图 7-221 所示，单击 Calculate 按钮，开始计算，累计计算 30s。

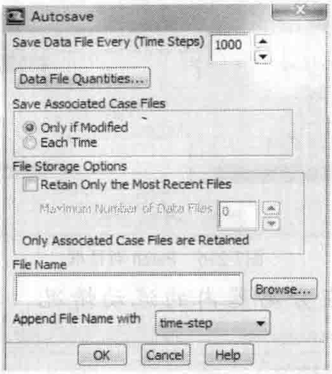


图7-220　Autosave 对话框

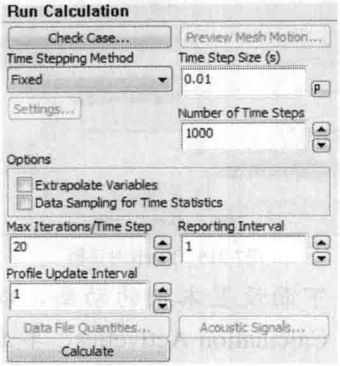


图7-221　Run Calculation 面板

7.7.5　结果后处理与分析

1. 单击 Graphics and Animations，在 Animations 中选中 Solution Animation Playback，单击 Set Up 按钮，弹出 Playback 对话框，在 Sequences 中选择 gas，Frame 下的一排按钮可以控制图像的播放，单击 Write/Record Format 右侧的下拉按钮，可以选择保存视频的格式，这里选择 MPEG，如图 7-222 所示。单击 Write 按钮，将气相的体积分数的变化视频保存下来。油相和水相的体积分数视频的保存方式操作一样，这里不再重复。

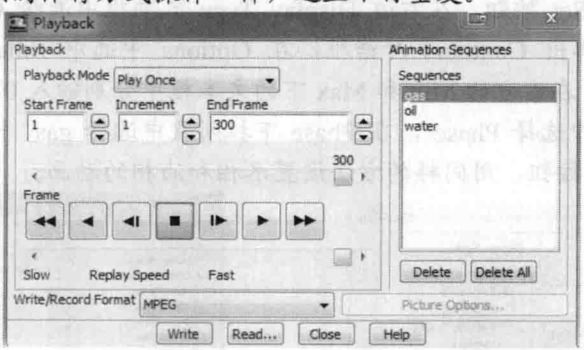


图7-222　Playback 对话框

2. 选择 File→Read→Data 命令，选择 7-7-1-1000.dat 数据文件，可以观测到 10s 时的数据。单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Contours，单击 Set Up 按钮，弹出 Contours 对话框，在 Options 中选中 Filled，在 Contours of 下拉列表中选择 Phase，在 Phase 下拉列表中选择 gas，单击 Display 按钮，可

以看到 10s 时的气相体积分数云图，如图 7-223 所示。其他时刻以及油相、水相体积分数云图操作也一样，这里不在重复，结果如图 7-224 ~ 图 7-231 所示。

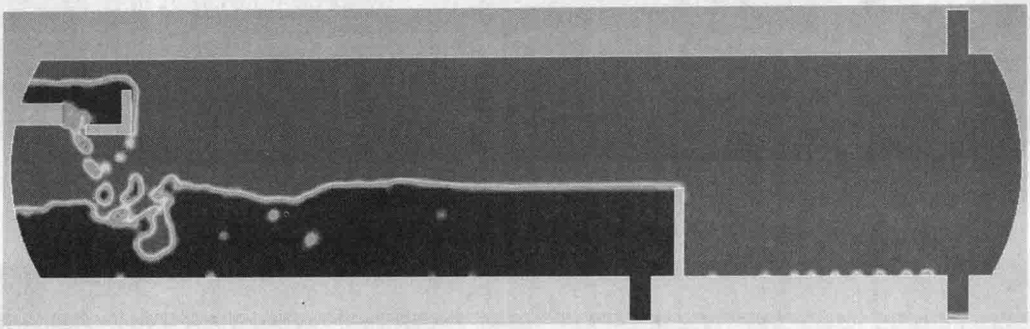


图7-223　10s 时气相的体积分数云图

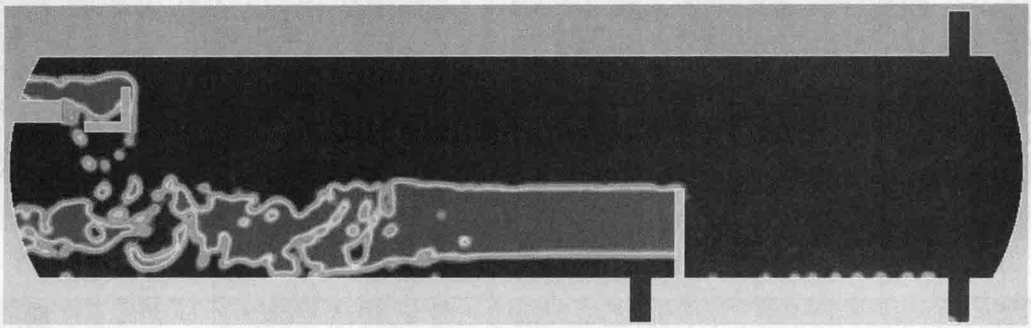


图7-224　10s 时油相的体积分数云图

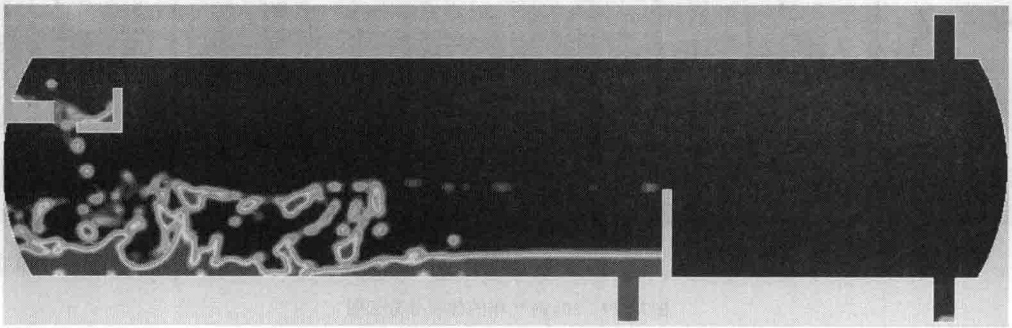


图7-225　10s 时水相的体积分数云图

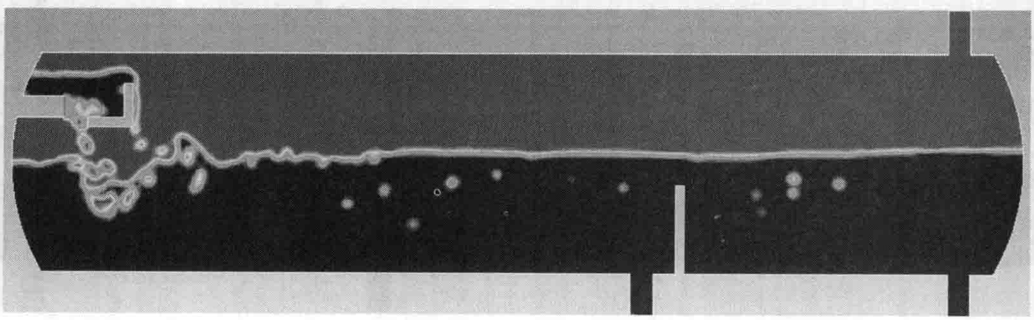


图7-226　20s 时气相的体积分数云图

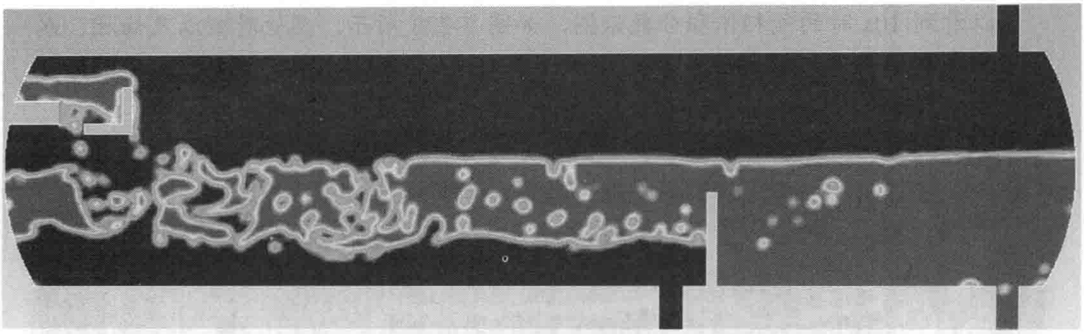


图7-227　20s 时油相的体积分数云图

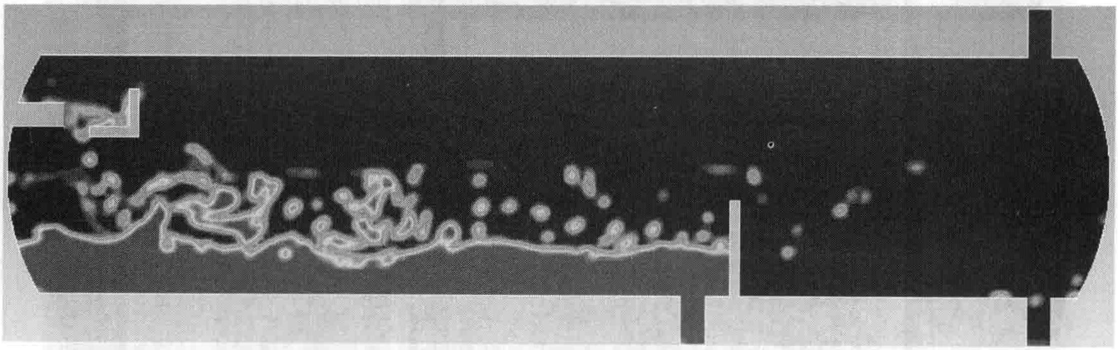


图7-228　20s 时水相的体积分数云图

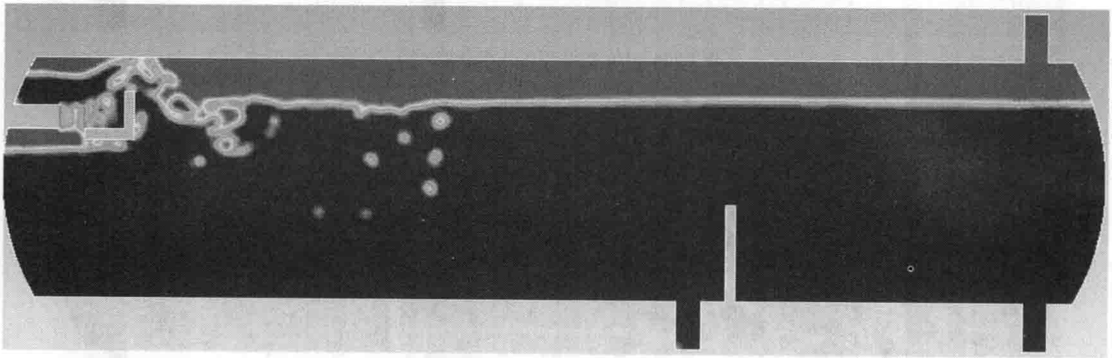


图7-229　30s 时气相的体积分数云图

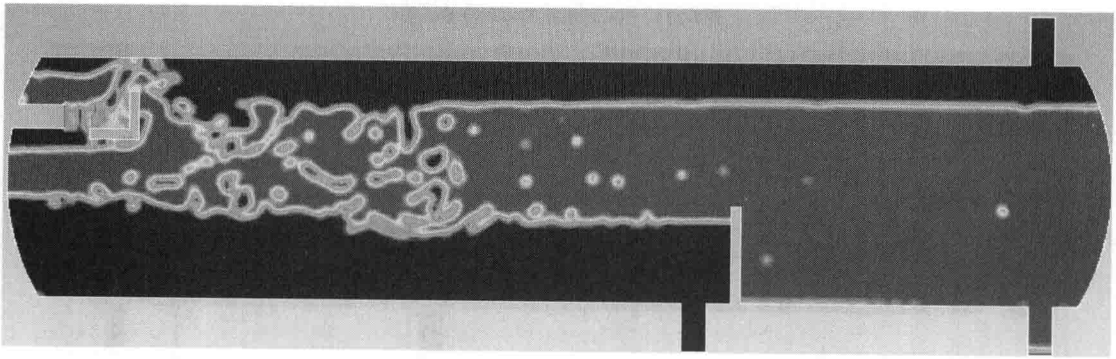


图7-230　30s 时油相的体积分数云图

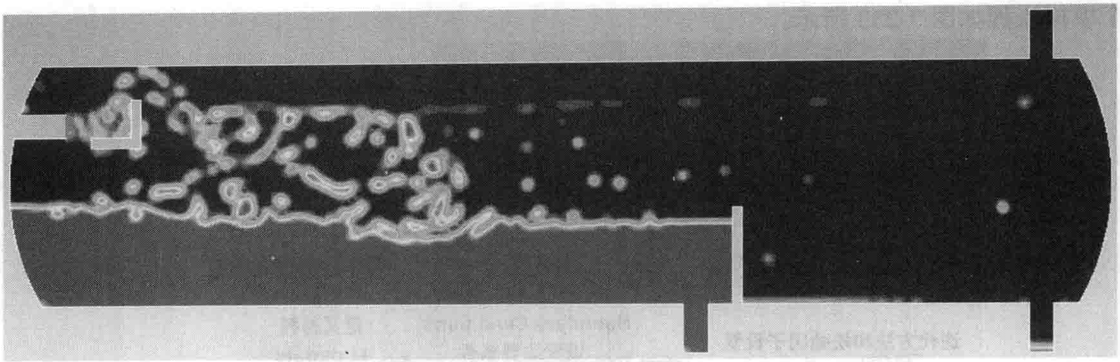


图7-231　30s 时水相的体积分数云图

7.8　液固两相流冲刷腐蚀模拟

液固两相流对材料的冲刷腐蚀在石油、化工生产领域广泛存在。暴露在运动流体中的所有类型的设备，如料浆输送管道、泵的过流部件和阀门等，都会遭受到冲刷腐蚀的破坏，尤其是在含固相颗粒的双相流中，破坏更为严重。因此冲刷腐蚀问题的研究引起了人们的高度重视。

7.8.1　案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 7-232 所示，选取某地面排污管道，其中排污总管总长 2.1m，直径 0.5m，排污管长 0.5m，直径 0.1m。水与沙子的液固混合物从上部进口进入，水流速度为 10m/s，沙子的初始速度为 0.1m/s，沙子流量为 0.1kg/s，沙粒直径为 0.00001m；左部进口速度为 0.1m/s，出口设置为自由出流。



图7-232　几何模型示意图

【思路分析】

本例为二维的液固两相流冲刷腐蚀模拟，首先要建立二维模型。由于是简单的二维管道模型，这里选用 Gambit 软件进行建模与网格划分。然后在 FLUENT 中调用 DPM 模型。整

个模拟流程如图 7-233 所示。

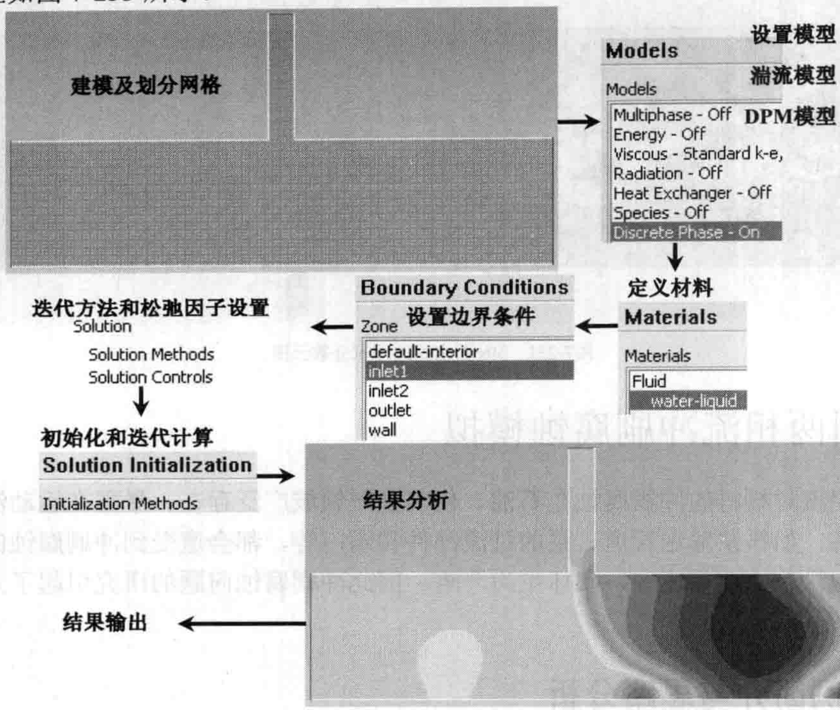


图7-233 液固两相流冲刷腐蚀模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的"END\Ch7\7-8.msh、7-8.cas、7-8.dat"文件。

动画演示——参见附带光盘中的"AVI\Ch7\7-8.avi"文件。

7.8.2 几何建模

1. 本例模型相对简单，只需启动 Gambit 软件，直接执行面建立命令。具体操作为：单击操作面板中的 → → 按钮，如图 7-234 所示，在 Create Real Vertex 面板中输入所要创建点的坐标分别为（0，0，0）、（0，0.5，0）、（1，0.5，0）、（1，1，0）、（1.1，1，0）、（1.1，0.5，0）、（2.1，0.5，0）、（2.1，0，0），生成的点如图 7-235 所示。

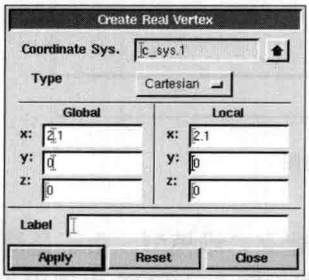


图7-234 Create Real Vertex 面板



图7-235 创建的点

2. 单击操作面板中的 → → 按钮，如图 7-236 所示，在 Creat Straight Edge 面板中，每两点为一组，首尾顺次连接所创建的各点，生成图 7-237 所示的八条线。

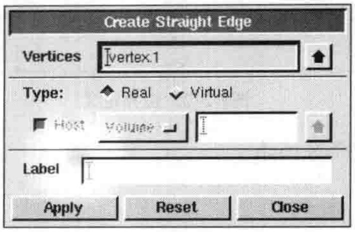


图7-236　Create Straight Edge 面板

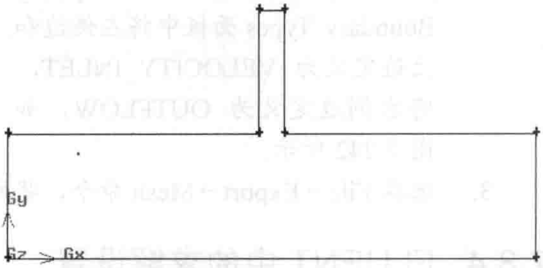


图7-237　生成线

3. 单击操作面板中的 → → 按钮，如图 7-238 所示，在 Create Face from Wireframe 面板中，选择全部建好的线，即生成图 7-239 示的几何模型。

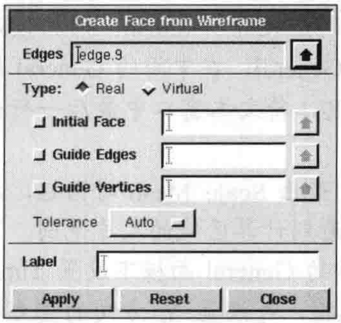


图7-238　Create Face from Wireframe 面板

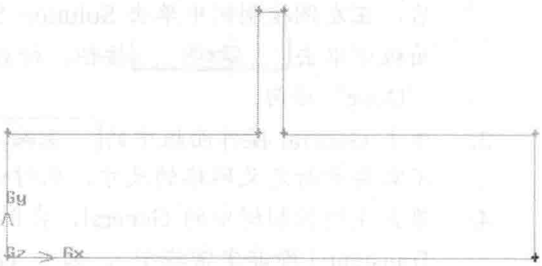


图7-239　几何面域

7.8.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在图 7-240 所示的 Mesh Faces 面板的 Faces 黄色输入栏中选取面 1（face.1），选择 Interval size 分段方式，并在左侧输入栏中输入 0.01，单击 Apply 按钮，得到的面网格如图 7-241 所示。

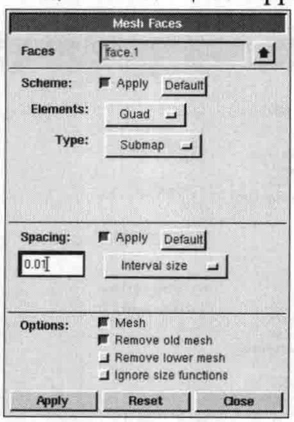
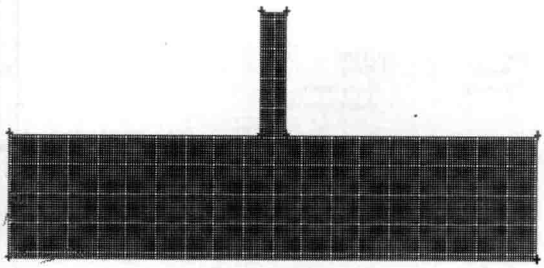


图7-240　Mesh Faces 面板


图7-241　面网格

2. 单击视图操作面板中的按钮，在弹出的 Specify Display Attributes 面板中，

将下方 Mesh 后面的 Off 选中，关闭视图窗口中的网格显示。单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将左侧边和上边定义为 VELOCITY_INLET，将右侧边定义为 OUTFLOW，如图 7-242 所示。

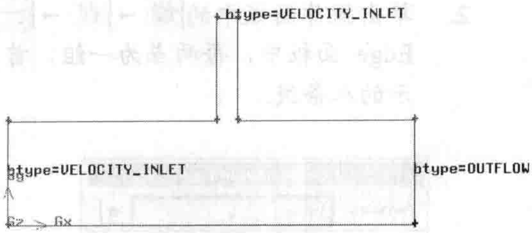


图7-242 边界定义

3. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 7-8.msh。

7.8.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→Read→Mesh 命令，读入划分好的网格文件 7-8.msh。网格读入之后，在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 操作面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现 “Done” 语句。
3. 单击 General 操作面板中的 Scale... 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，从对话框中可以看到计算区域的尺寸范围。
4. 单击左侧控制树中的 General，在图 7-243 所示的 General 面板下设置 Time 为 Transient（即非定常模型），选中 Gravity 复选框，并设置 Y 方向的重力加速度为-9.8m/s^2。
5. 由于是高速携沙流体，雷诺数较大，属于湍流流动，这里需要设置湍流模型。在中间的 Models 对话框中双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 7-244 所示。在该对话框中，选择 Model 下的 k-epsilon (2 eqn)，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，在 Near-Wall Treatment 中选择 Standard Wall Functions（标准壁面函数），模型参数保持默认设置，单击 OK 按钮。

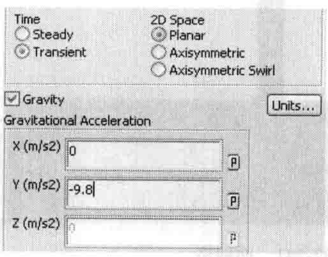


图7-243 General 面板

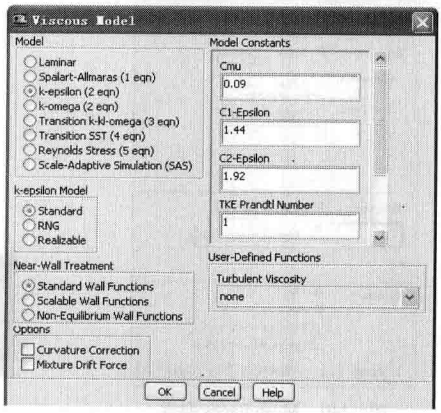


图7-244 Viscous Model 对话框

6. 设置DPM模型。在左侧控制树中选择Model，在Model控制面板中选中并双击Discrete Phase-off，进入图7-245示的Discrete Phase Model对话框，选中Interaction with Continuous Phase，其他保持默认设置。单击下方Physical Models选项卡，如图7-246所示，选中Erosion/Accretion。单击Discrete Phase Model对话框下方的 Injections... 按钮，打开图7-247所示的Injections对话框，单击 Create 按钮，进入图7-248所示的Set Injection Properties对话框，设置Injection Type为surface，设置Release From Surfaces为inlet1，Particle Type为Inert，Material为sulfur-solid（作为沙子材质），Diameter Distribution为uniform；设置Point Properties选项卡下的Y-Velocity为0.1m/s，Diameter为0.00001m，Start Time为0，Stop Time为5，Total Flow Rate为0.1kg/s。其他设置保持默认，单击OK按钮。此时，原来的Injections对话框中会出现injection-0，单击 Close 按钮，回到Discrete Phase Model对话框，单击OK按钮，完成DPM模型的调用设置。

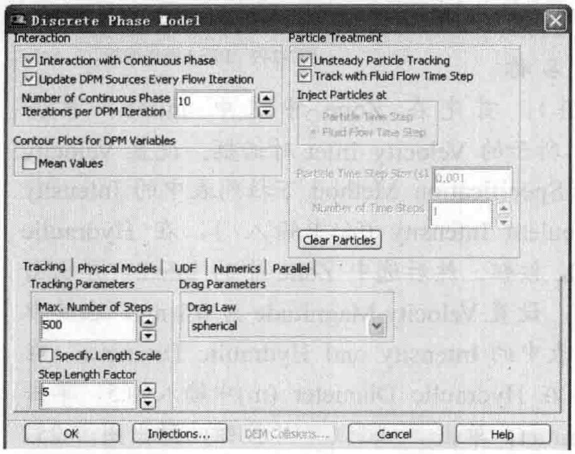


图7-245　Discrete Phase Model对话框

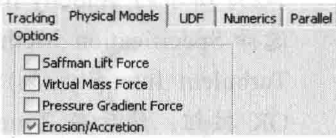


图7-246　Physical Models选项卡



图7-247　Injections对话框

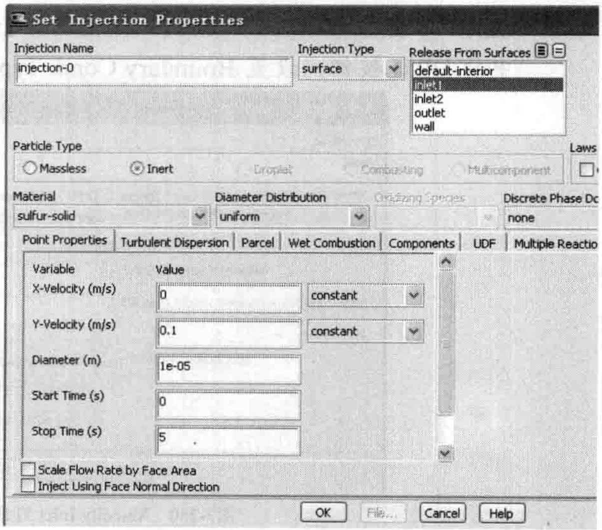


图7-248　Set Injection Properties对话框

7. 单击左侧控制树中的 Materials，在中间的 Materials 操作面板中单击 Create/Edit... 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。单击 Fluent Database... 按钮，在 Fluent Database Materials 对话框的 Fluent Fluid Materials 中选中 Water-liquid(h2o<l>)。

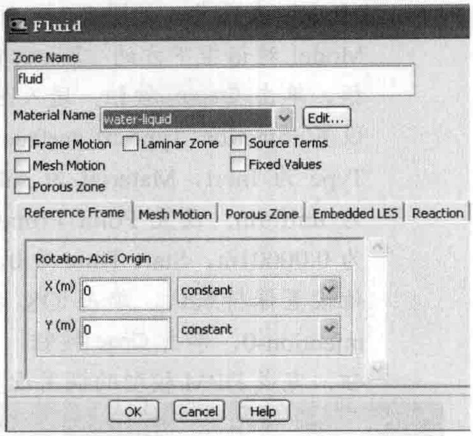


图7-249　Fluid 操作面板

8. 单击左侧控制树中的 Cell Zone Conditions，双击 Zone 面板中的 fluid，弹出图 7-249 示的 Fluid 对话框。设置 Material Name 为 water-liquid。单击 OK 按钮，完成 Cell Zone Conditions 的设置。

9. 完成上述操作后，开始定义边界条件。单击左侧控制树中的 Boundary Conditions 按钮，在中间的 Boundary Conditions 控制面板中可以看到在 Gambit 中定义好的边界条件名称（inlet1、inlet2、outlet 和 wall）。首先在 Zone 中选中 inlet1，单击 Edit... 按钮，弹出图 7-250 所示的 Velocity Inlet 对话框。设置 Velocity Magnitude 为 10m/s，在其中选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity (%)中输入 1，在 Hydraulic Diameter (m)中输入 0.1，单击 OK 按钮。然后选中 Zone 中的 inlet2，弹出图 7-251 所示的 Velocity Inlet 对话框。设置 Velocity Magnitude 为 0.1m/s，在其中选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity (%)中输入 1，在 Hydraulic Diameter (m)中输入 0.5，单击 OK 按钮。然后在 Zone 中选中 outlet，单击 Edit... 按钮，弹出图 7-252 所示的 Outflow 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。最后在 Zone 中选中 wall，单击 Edit... 按钮，弹出图 7-253 所示的 Wall 对话框，单击对话框中的 DPM 按钮，设置 Boundary Cond. Type 为 reflect。

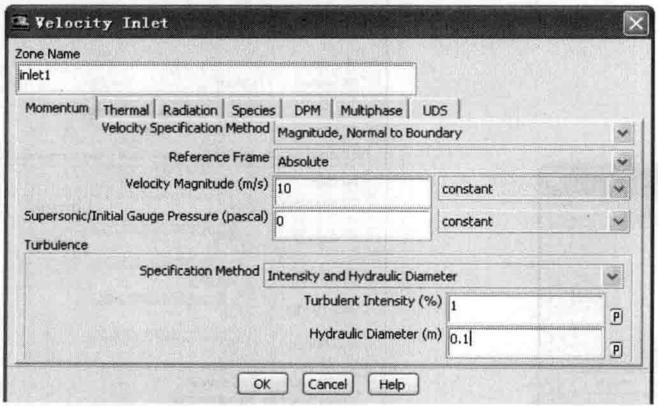


图7-250　Velocity Inlet 对话框（inlet1）

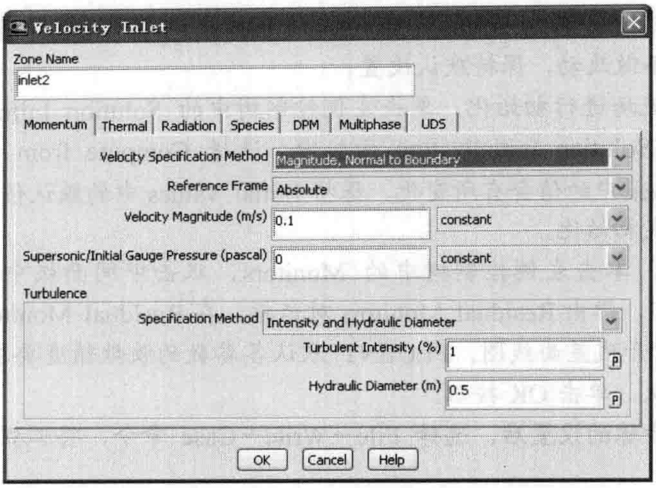


图7-251　Velocity Inlet 对话框（inlet2）

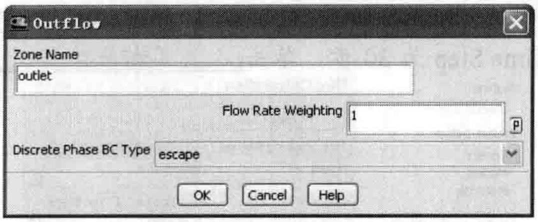


图7-252　Outflow 对话框

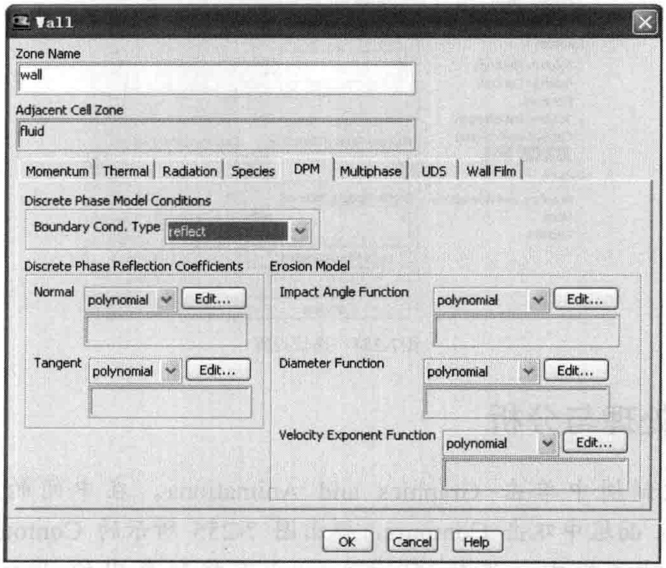


图7-253　Wall 对话框

10. 边界定义好后，在左侧控制树中单击 Solution Methods，中间区域即出现 Solution Methods 面板，用户可以在该面板中设置压力-速度耦合和求解方式，动量、湍动能、湍动能耗散率等参数的差分形式等。这里保持默认设置，不做改动。

11. 在左侧控制树中单击 Solution Controls，可以看到中间面板中各参数的松弛因子。这里不做改动，保持默认设置。
12. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 面板中，选择 Compute from 为 inlet，这时 Initial Values 中的值会有所变化，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮，完成初始化。
13. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间面板中的 "Residuals-Print, Plot"，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框选中 Plot，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
14. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 7-8.cas。
15. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 面板（见图 7-254）中，设置 Time Step Size 为 0.001s，Number of Time Steps 为 2000 步，Max Iterations/Time Step 为 30 步，单击 Calculate 按钮开始解算。

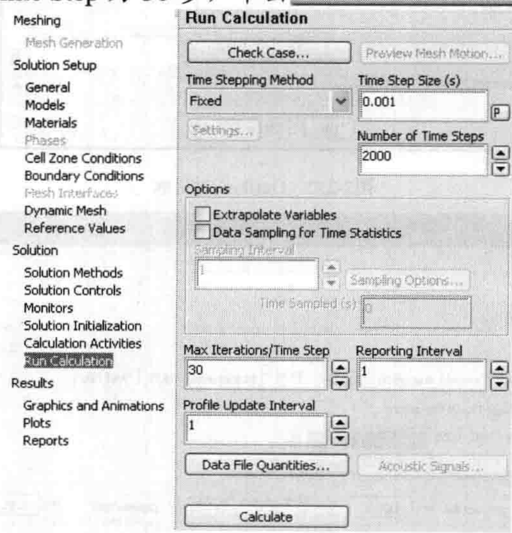


图7-254　迭代设置

7.8.5 结果后处理与分析

1. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours，弹出图 7-255 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure 和 Static Pressure，并选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-256 所示的压强分布云图。

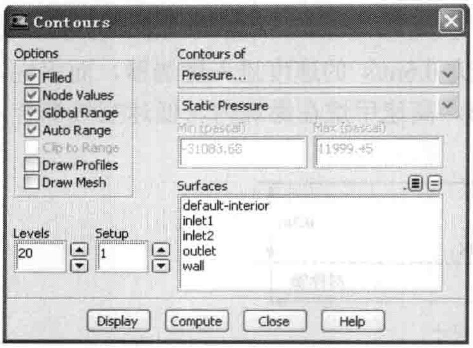


图7-255 Contours 对话框

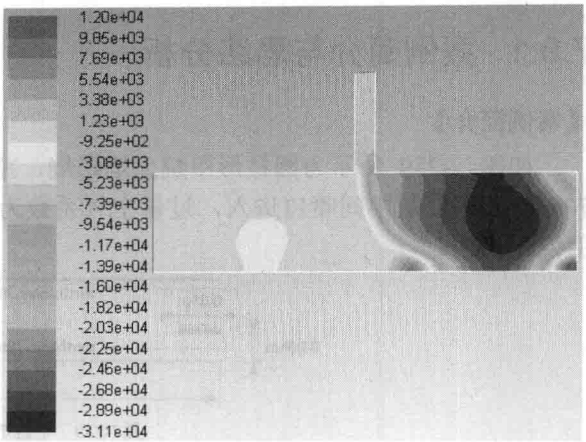


图7-256 压强分布云图

2. 改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Velocity 和 Velocity Magnitude，并选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-257 所示的速度分布云图。
3. 改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Discrete Phase Variables 和 DPM Erosion，并选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-258 所示的冲蚀速率分布云图。从图中可以看出，受排污总管中的水流影响，冲蚀最为严重的地方向下游方向移动了一定的距离。

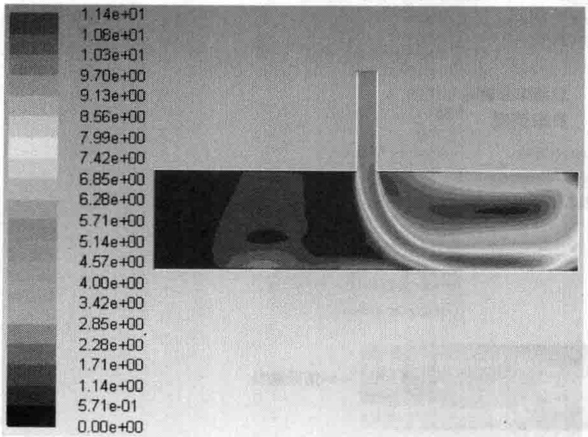


图7-257 速度分布云图

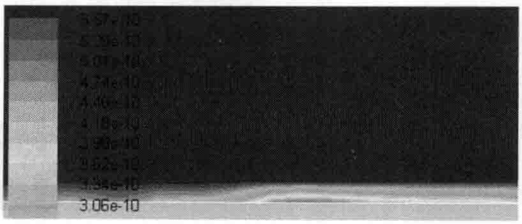


图7-258 冲蚀速率分布云图

4. 选择 File→Write→Data 命令，将结果文件保存为 7-8.dat。
5. 选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

7.9 甲烷燃烧器模拟

燃烧是最常见的化学反应，圆柱形甲烷火焰燃烧器是工程中常用的燃烧器之一。那么，甲烷进入燃烧器之后是怎么燃烧的？燃烧得是否完全？燃烧后的产物浓度是多少？这些都是工程实际中面临的问题。这里我们对甲烷火焰燃烧问题进行模拟。

7.9.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 7-259 所示为圆柱形甲烷火焰燃烧，空气以 0.6m/s 的速度进入燃烧器，而甲烷以 70m/s 的速度从中间喷口进入，过量空气系数为 1.3。高速甲烷在燃烧内与低速空气混合，并发生反应。

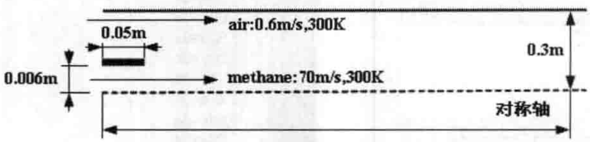


图7-259 甲烷燃烧器尺寸

【思路分析】

本例具有轴对称性，在不考虑重力的条件下，建模时可以只建立轴向剖面的一半，而将轴线处设置成对称轴。选用燃烧模型，即燃料完全燃烧成二氧化碳和水。反应是扩散控制的，因此这里应使用涡耗散模型对其进行模拟。整个模拟的计算流程如图 7-260 所示。

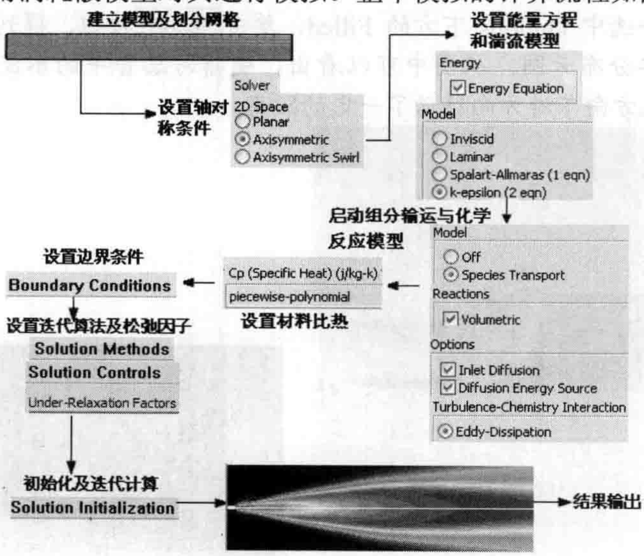


图7-260 甲烷燃烧器分析模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch7\7-9.msh、7-9.cas、7-9.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch7\7-9.avi”文件。

7.9.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击按钮，依次创建（0，0，0）、(0.05，0，0)、（3，0，0）、（3，0.006，0）、（3，0.3，0）、（0.05，0.3，0）、（0，0.3，0）、（0，0.006，0）、（0.05，0.006，0）共 9 个点，如图 7-261 所示。



图7-261 绘制好的点

2. 单击 → → 按钮，打开 Create Straight Edge 面板，创建点 1（vertix.1）与点 2（vertix.2）、点 2 与点 9、点 9 与点 8、点 8 与点 1、点 2 与点 3、点 3 与点 4、点 4 与点 9、点 4 与点 5、点 5 与点 6、点 6 与点 7、点 7 与点 8、点 6 与点 9 之间的线段，共 12 条线段，如图 7-262 所示。
3. 将线段 1、线段 2、线段 3、线段 4 和线段 2、线段 5、线段 6、线段 7 分别组成两个面；线段 7、线段 8、线段 9、线段 11 和线段 3、线段 10、线段 11、线段 12 分别组成两个面。单击 → → 按钮，在 Create Face from Wireframe 面板的 Edge 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何面。本例生成的 4 个面如图 7-263 所示。

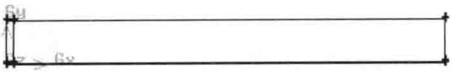


图7-262 绘制好的线段

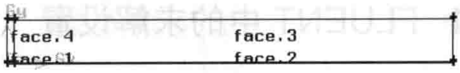


图7-263 绘制好的面

7.9.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 黄色输入栏中选中线段 1、线段 2、线段 3、线段 4、线段 6、线段 10，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 5，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。选中线段 5、线段 7、线段 9，线段 5、线段 7、线段 9 的红色箭头由右指向左，设置 Ratio 的节点距离比例为 0.96，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 150，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。选中线段 8、线段 11、线段 12，线段 8、线段 11、线段 12 的红色箭头由上指向下，设置 Ratio 的节点距离比例为 0.96，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 60，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。划分好的线网格如图 7-264 所示。

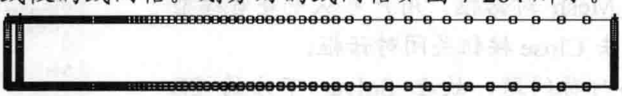


图7-264 线网格的划分

2. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的 4 个面，运用 Quad 单元与 Map 方法对其进行划分，其他设置保持默认，其生成的面网格如图 7-265 所示。

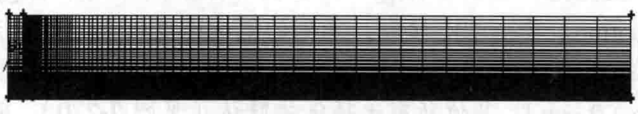


图7-265 面网格的划分

3. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中，将线段 4 定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 ch4-in；将线段 12 定义为速度入口

（VELOCITY_INLET），名称为 air-in；将线段 3、线段 9、线段 10 定义为壁面（WALL），名称为 bi-mian；将线段 6、线段 8 定义为压力出口（PRESSURE_OUTLET），名称为 out；线段 1 和线段 5 定义为轴对称边界（AXIS），名称为 axis。定义好的边界如图 7-266 所示。

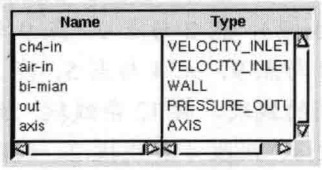


图7-266　定义好的边界类型

4. 选择 File→Save As 命令，将工程文件保存为“7-9”。同时，选择 Export→Mesh 命令，输出网格文件 7-9.msh。

7.9.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→Read→Mesh 命令，导入 7-9.msh 文件。读入网格文件之后，FLUENT 控制台窗口会提示图 7-267 所示的警告信息，提示我们将问题修改为轴对称问题。在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。

```
Warning: The use of axis boundary conditions is not appropriate for
         a 2D/3D flow problem. Please consider changing the zone
         type to symmetry or wall, or the problem to axisymmetric.

Warning: The use of axis boundary conditions is not appropriate for
         a 2D/3D flow problem. Please consider changing the zone
         type to symmetry or wall, or the problem to axisymmetric.
```

图7-267　警告信息

3. 单击 Problem Setup 的 General 中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭对话框。
4. 由于本例为对称问题，故在 Solver 下方的 2D Space 选项中选中 Axisymmetric，如图 7-268 所示，其余保持默认，单击 OK 按钮。

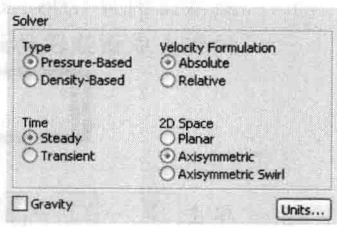


图7-268　设置轴对称模型

5. 本例需要启动能量方程进行计算。单击 Problem Setup 中的 Models，双击 Energy，弹出图 7-269 所示的 Energy 对话框，选中 Energy Equation，单击 OK 按钮。本例的甲烷速度较大，故应为湍流流动。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，在弹出的 Viscous Model 对话框中选中 k-epsilon（2 eqn），其他所有选项保持默认（见图 7-270），单击 OK 按钮。

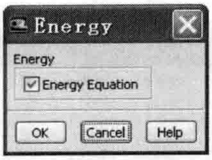


图7-269　选择能量方程

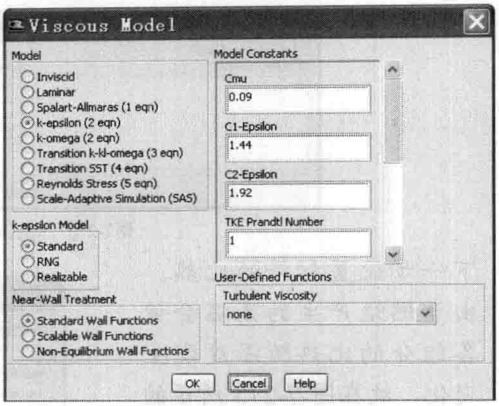


图7-270　Viscous Model 对话框

6. 启动组分输运与化学反应模型。单击 Models，双击 Species，弹出图 7-271 所示的 Species Model 对话框，选中 Reactions 栏中的 Volumetric 选项，此时 Turbulence-Chemistry Interaction 下方出现了几个选项，本例选择 Eddy-Dissipation，即启动了涡耗散模型。在 Option 选项下选中 Inlet Diffusion 和 Diffusion Energy Source，即选择了入口扩散和扩散能量来源选项。接着在 Mixture Material 下拉列表中选择 methane-air，单击右侧的 Edit... 按钮，弹出图 7-272 所示的 Edit Material 对话框。
7. 在 Edit Material 对话框中，单击 Mixture Species 右侧的 Edit... 按钮，弹出图 7-273 所示的 Species 对话框，其中的 Selected Species 为已经选组分列表，从上到下依次是甲烷、氧气、二氧化碳、水和氮气，满足质量分数逐渐增加的规律（最大组分——氮气在最下端）。
8. 单击 Edit Material 对话框下 Reaction 选项右侧的 Edit... 按钮，弹出图 7-274 所示的 Reactions 对话框。从中我们可以看到 Arrhenius Rate 下面的系数均为灰色显示，这是因为我们选用了涡耗散模型，而忽略了 Arrhenius 反应速率的化学动力学影响所致。Reactions 对话框还反映了本例完成的化学反应方程 $CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$。保持对话框中的所有默认设置，单击 OK 按钮关闭 Species 对话框，单击 Close 按钮关闭 Edit Material 对话框，最后单击 OK 按钮，完成组分输运与化学反应模型的定义。

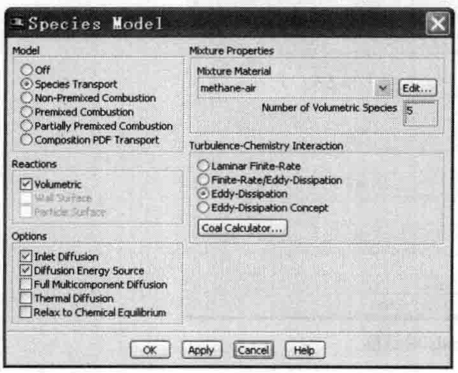


图7-271　Species Model 对话框

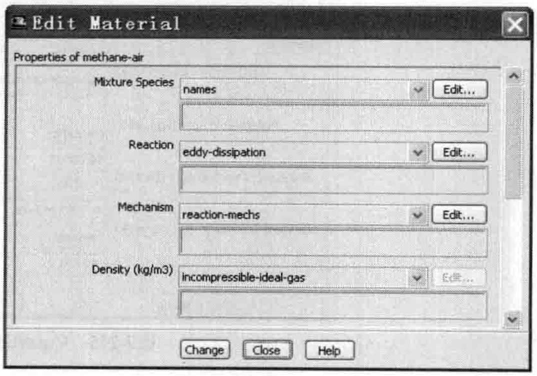


图7-272　Edit Material 对话框

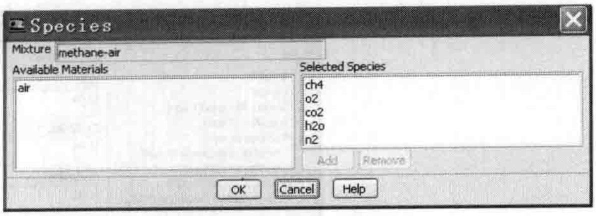


图7-273 Species 对话框

9. 下一步设置材料的比热。由于燃烧产生的高温会使各组分的比热随温度发生变化，故在图 7-275 所示的 Creat/Edit Materials 对话框中选择类型为 fluid，先选择 carbon-dioxide(co2)，设置其 Cp 为 piecewise-polynomial（分段多项式）方式，此时会弹出图 7-276 所示的 Piecewise-Polynomial Profile 对话框，保持其默认设置，单击 OK 按钮。回到 Material 对话框中，单击 Change/Create 按钮保存设置。甲烷、氧气、水、氮气的比热设置与二氧化碳一样，这里不再详述。

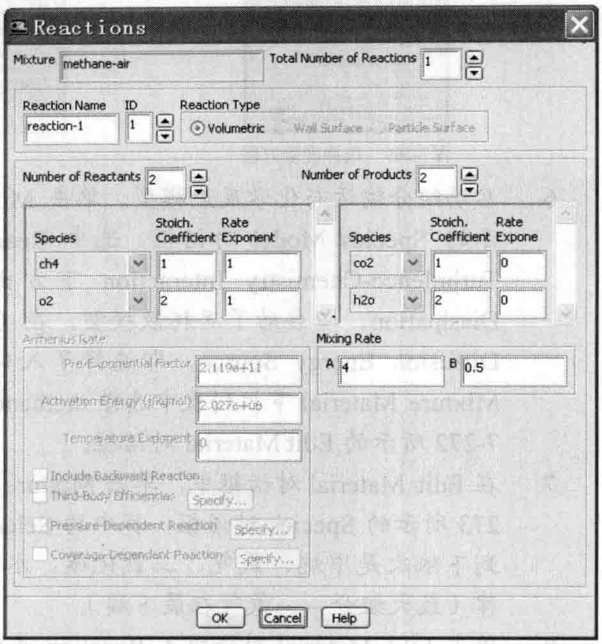


图7-274 Reactions 对话框

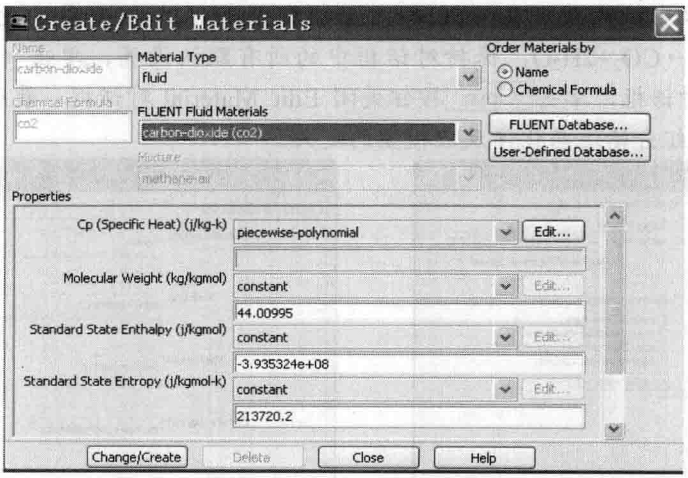


图7-275 Creat/Edit Materials 对话框

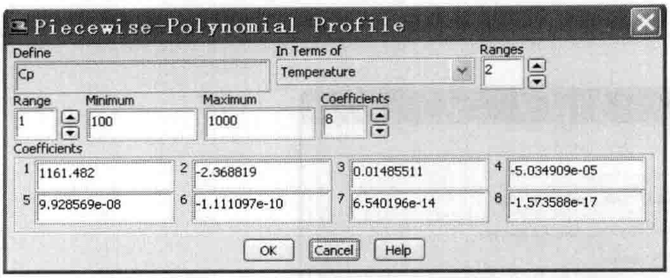


图7-276　Piecewise-Polynomial Profile 对话框

10. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 air-in，其 Type 类型为 Velocity-inlet，单击 Edit... 按钮，打开图 7-277 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute。在 Velocity Magnitude(m/s) 右侧输入 0.6，选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity(%)为 10，Hydraulic Diameter(m) 为 0.294。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 选项卡，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 7-278 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 ch4、o2、co2、h2o，这里只需在 o2 后面输入 0.23。因为空气中只包含氧气和氮气，而氮气为质量分数最大的组分，在这里不显示，也不用定义，其质量分数将通过 1 减去其他组分求得。设置完组分浓度后，单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

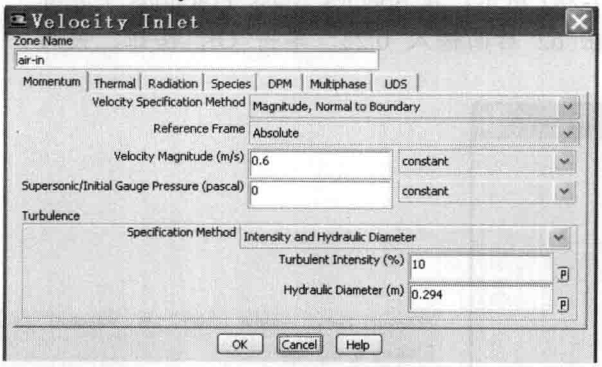


图7-277　Velocity Inlet 对话框

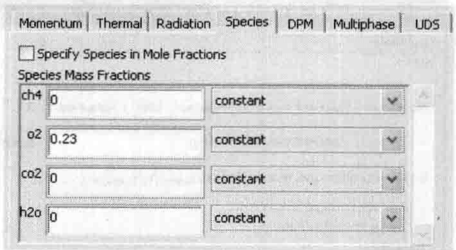


图7-278　Species 选项卡

11. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 ch4-in，其 Type 类型为 Velocity-inlet，单击 Edit... 按钮，打开图 7-279 所示 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute。在 Velocity Magnitude[m/s]右侧输入 70。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity(%)为 10，Hydraulic Diameter(m)为 0.006。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 选项卡，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 7-280 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 ch4、o2、co2、h2o，这里只需在 ch4 后面输入 1。因为甲烷

进口为纯甲烷组分。设置完组分浓度后，单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

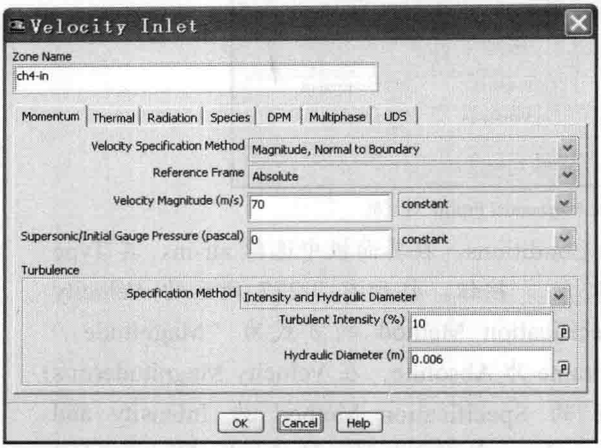


图7-279 Velocity Inlet 对话框

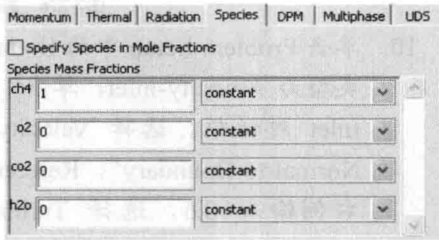


图7-280 Species 选项卡

12. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 out，其 Type 类型为 Pressure Outlet。保持 Gauge Pressure(pascal)为 0，即环境气压为 1 个大气压。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulence Intensity(%)为 10，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 0.3（见图 7-281）。在 Thermal 选项卡中，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 7-282 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 ch4、o2、co2、h2o，这里只需在 o2 后面输入 0.23。单击 OK 按钮，关闭 Pressure Outlet 对话框。

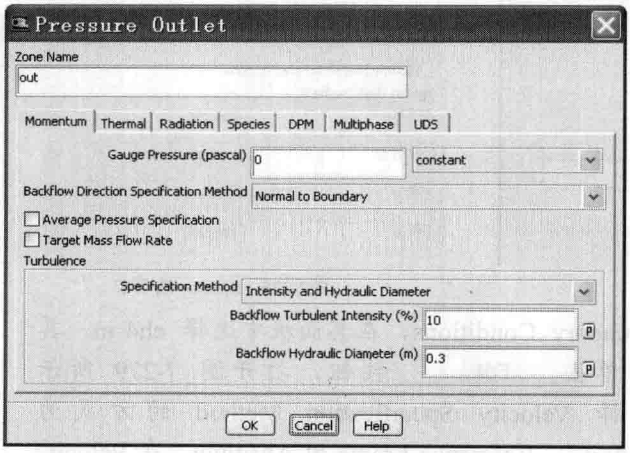


图7-281 Pressure Outlet 对话框

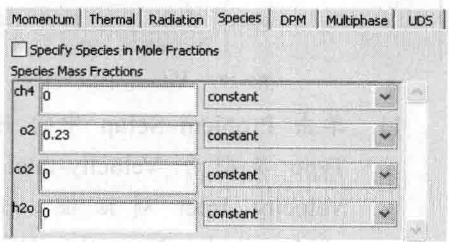


图7-282 Species 选项卡

13. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 bi-mian，其 Type 类型为 Wall，单击 Edit... 按钮，打开 Wall 对话框。选择对话框中的 Thermal 选项卡，设置 Thermal Condition 为 Temperature，保持 Temperature 为 300K 不变，单击 OK 按钮。

14. 边界定义完成后，对求解参数进行设置。单击 Solution 中的 Solution

Methods，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认算法设置。

15. 接下来单击 Solution 中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。
16. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的 Solution Initialization，在中间区域的 Solution Initialization 控制面板中，选择 Compute from 为 all-zones，保持 Initial Values 中的默认值，单击 Initialize 按钮，完成初始化。
17. 初始化后，单击左侧控制树中的 Monitors，双击中间控制面板的 “Residuals-Print, Plot”，弹出 Residual Monitors 对话框。在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
18. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 500 步，单击 Calculate 按钮开始解算。迭代至 473 步时，问题收敛。

7.9.5 结果后处理与分析

1. 为了显示整个图形，我们选择 Display→Views 命令，弹出 View 对话框。选择 Mirror Planes 下的 duichengzhou，单击 Apply 按钮，即可显示整个图形。
2. 在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中双击 Contours，弹出图 7-283 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Temperature，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 7-284 所示的温度分布云图。

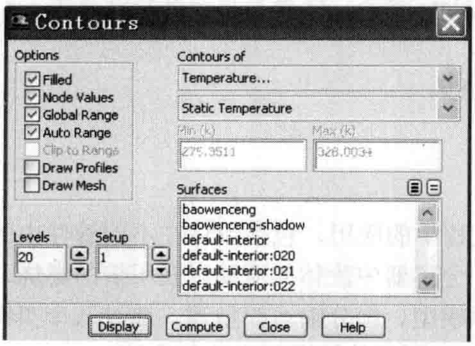


图7-283　Contours 对话框

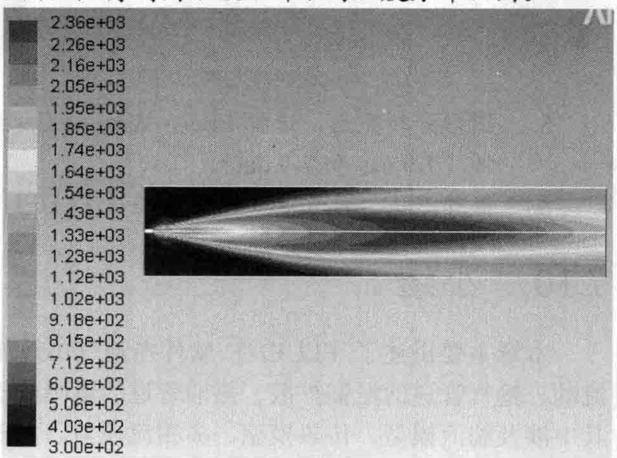


图7-284　温度分布云图

3. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下方的 Properties 和 Specific Heat(Cp)，单击 Display 按钮，得到图 7-285 所示的定压比热分布云图。
4. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下方的 Species 和 Mass fraction of ch4，单击 Display 按钮，得到图 7-286 所示的甲烷浓度分布云图。改变 Contours of 下方的 Mass fraction of ch4 选项为 Mass fraction of o2，可得到图 7-

287 所示的氧气浓度分布云图。

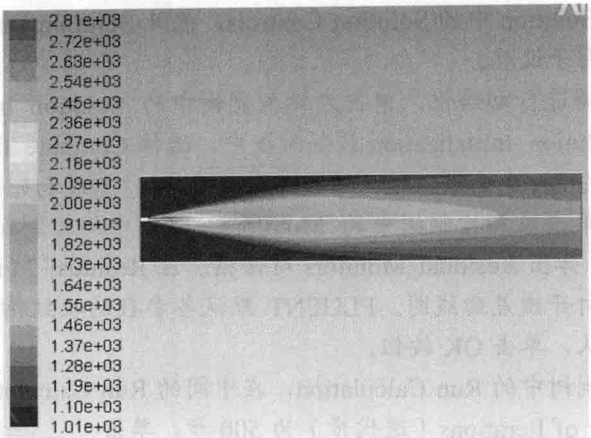


图7-285　定压比热分布云图

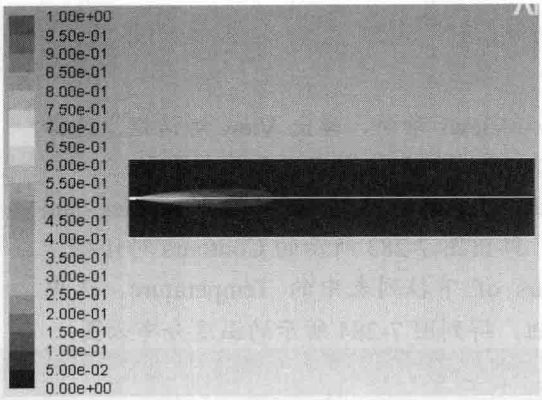


图7-286　甲烷浓度分布云图

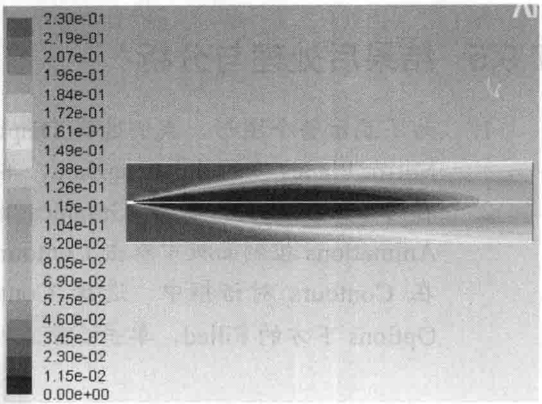


图7-287　氧气浓度分布云图

5. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（7-9.cas 和 7-9.dat）。
6. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

7.10　小结

本章主要讲述了 FLUENT 软件在油气田地面工程中的应用，包括流体在不同管件中的流动、输气管道的泄漏扩散、热油管道的温降分析、分离器中流体的流动以及甲烷的燃烧，其中涉及湍流模型、传热模型、多相流模型、离散相模型、组分输运模型等。通过八个实例的介绍，读者可以掌握利用 FLUENT 解决油气田地面工程具体问题的思路与方法。

第8章 海洋油气工程中的应用

随着海洋油气资源的不断开发，各种海洋平台工程以及开采过程中涉及的管柱结构日益增多。由于海洋环境复杂多变，海洋钻采平台的支柱受到桩柱周围局部水流动力场变化的影响，水流动力场对平台桩基进行冲刷，严重影响了平台的稳定性。另外，钻采中使用的管线一般为细长结构，受到海流的冲击，会导致发生涡激振动，在持续的涡激振动下，最终导致隔水管/立管的失效或疲劳破坏。一旦海洋隔水管/立管结构发生破坏，除了造成重大的经济损失外，其泄漏的石油及钻井液还会对海洋环境造成灾难性的破坏。本章对 FLUENT 在海洋油气工程中的应用进行介绍，通过 5 个典型实例详细介绍海洋油气工程中所涉及的流体问题的数值处理方法及过程。

本章内容

- 海洋油气工程中涉及的 CFD 问题。
- 海底液固两相流动冲刷模拟。
- 海洋圆柱形立管绕流模拟。
- 数值造波技术。
- 平台储罐天然气泄漏扩散模拟。
- 水力旋流器油水分离模拟。

本章案例

- 实例 1：海洋平台桩基冲刷分析。
- 实例 2：海洋立管绕流分析。
- 实例 3：二维数值造波。
- 实例 4：平台储罐天然气泄漏扩散模拟。
- 实例 5：水力旋流器油水分离模拟。

8.1 概述

我国管辖海域内的油气资源十分丰富。在 2010 年，中海油国内油气年产量首次突破具有标杆意义的 5000 万吨油当量，等于为国家建成了一个“海上大庆油田”。2012 年，“海洋石油 981”在南海海域正式开钻，标志着中国海洋石油工业的深水战略迈出了实质性的步伐。

早期的浅水海洋平台大都为坐底式，包括导管架平台、重力式混凝土平台等。如图 8-1 所示即为一个导管架平台，支撑平台的桩脚插入海底床面，但由于海流的存在，海水绕过平台桩基时会形成旋涡，在平台桩基后方造成海床砂粒的起动和运移，使桩柱周围的海底泥沙产生一定程度的冲刷，形成冲刷坑，进而影响平台的稳定性。因此，平台桩基冲刷机理的研究对平台的安全具有重要的工程意义。

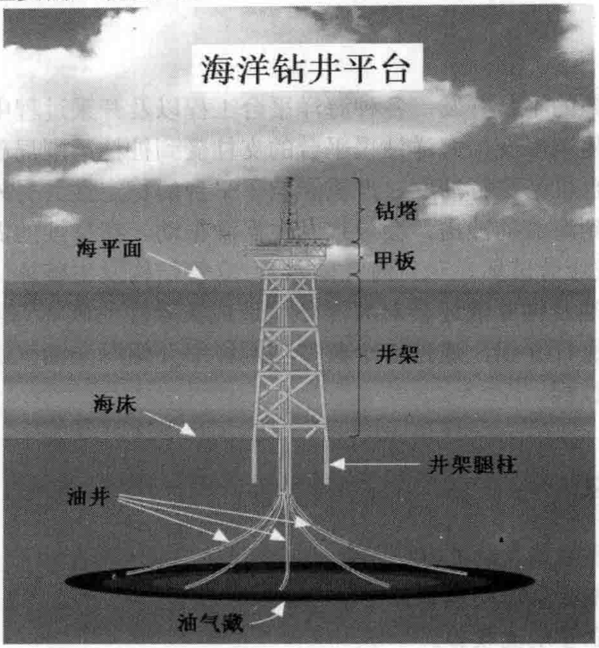


图8-1　导管架平台

海上油气资源的开采力度不断加大，开采过程中必然涉及隔水管、采油立管和悬跨输液管等管线，如图 8-2 所示。

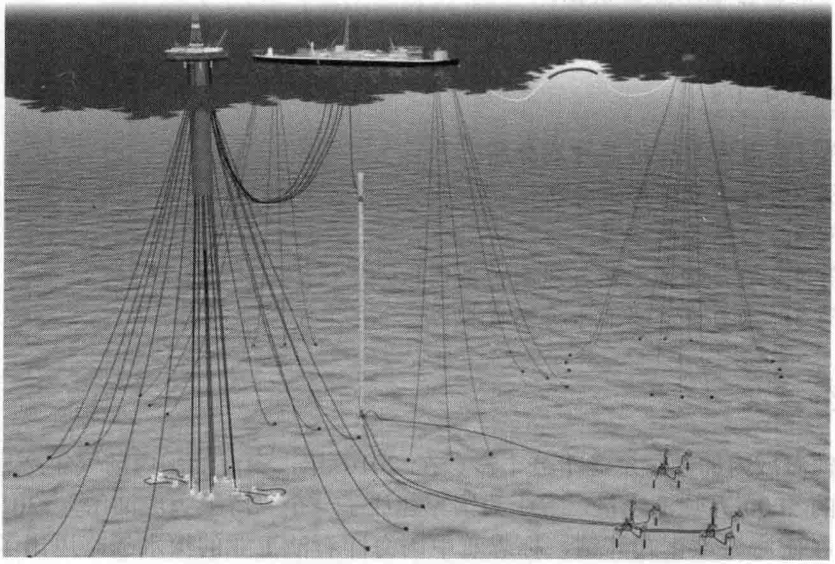


图8-2　深海立管采油系统图

这些管线的造价占整个深海采油系统造价的一半以上。尤其是当一定流速的波浪、海流流经海洋管线时，会在其表面形成黏性边界层。黏性边界层在一定雷诺数范围内容易与壁面发生分离，进而产生旋涡脱落，脱落的旋涡以周期性的交替方式离开圆柱表面，形成了著名的卡门涡街，如图 8-3 所示，涡街的存在会对海洋管线施加一个横向（cross-flow directions）和纵向（in-line directions）的周期性的交变作用力，从而诱发振动。当旋涡脱落频率接近或等于隔水管的某一固有频率时，就会发生共振现象，即涡激振动。共振将导致振动幅度急剧增大，最终导致隔水管的失效或疲劳破坏。随着开采水深的加大，海洋管线的长径比迅速增大，犹如一根面条悬挂在海流中，面对海流显得更弱不禁风。一旦海洋隔水管结构发生破坏，除了造成重大的经济损失外，其泄漏的石油及钻井液还会对海洋环境造成灾难性的破坏。因此，关于海洋管线的涡激振动问题是目前海洋工程的重点研究对象。

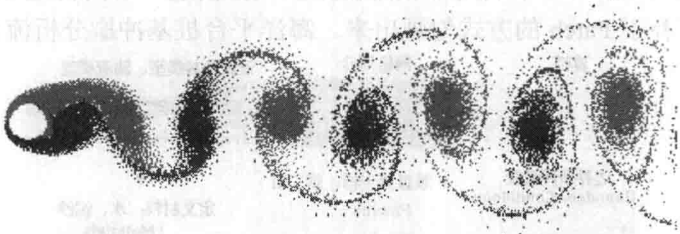


图8-3　卡门涡街

针对海流对海洋平台桩柱的冲刷问题以及海洋管线涡激振动问题，利用 FLUENT 软件开展相关的数值模拟，可以为工程实践提供有价值的参考。下面就海洋石油工程中出现的典型问题进行分析，帮助读者掌握利用 FLUENT 分析海洋油气工程问题的方法及过程。

8.2　海洋平台桩基冲刷分析

8.2.1　案例简介与思路分析

海洋石油平台一旦建立，就改变了平台周围的水动力条件，平台的桩柱周围底部会发生冲刷现象。资料表明，埕岛油田的很多平台区存在显著的桩基冲刷问题，平台的桩柱周围海底冲刷深度可达 2.5～3.0m。桩基冲刷会对平台的安全产生什么样的影响，如何针对桩基冲刷问题提出对策，改善桩基稳定性，并指导今后油井平台的建设和安全防护，就成为一个十分重要和迫切的课题。

【案例简介】

如图 8-4 所示，取长×宽×高=10m×5m×4m 的长方体进行数值模拟，其中平台桩柱直径为 1.2m，平台桩柱的位置位于长方体左侧，平台桩柱中心距左侧面为 2.5m，距前后面均为 2.5m，上部海水深度为 3m，下部泥沙深度为 1m，泥沙的密度为 2600kg/m^3，比热为 1100J/(kg·K)，导热系数为 0.3W/(m·K)，颗粒直径为 0.001m，左侧海水流速为 1m/s。

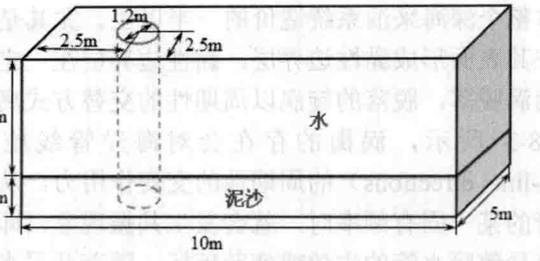


图8-4　平台桩柱示意图

【思路分析】

本例为三维的液固两相流动模拟，首先要建立三维模型。模型相对简单，这里选用 Gambit 软件进行建模与网格划分。模型建立时，首先建立一个面域，网格划分时再将其拉升成体。然后，在 FLUENT 中调用多相流模型的欧拉模型。本例初始化时，需要将泥沙的初始分布状态用打补丁 Patch 的方式勾画出来。海洋平台桩基冲刷分析流程如图 8-5 所示。

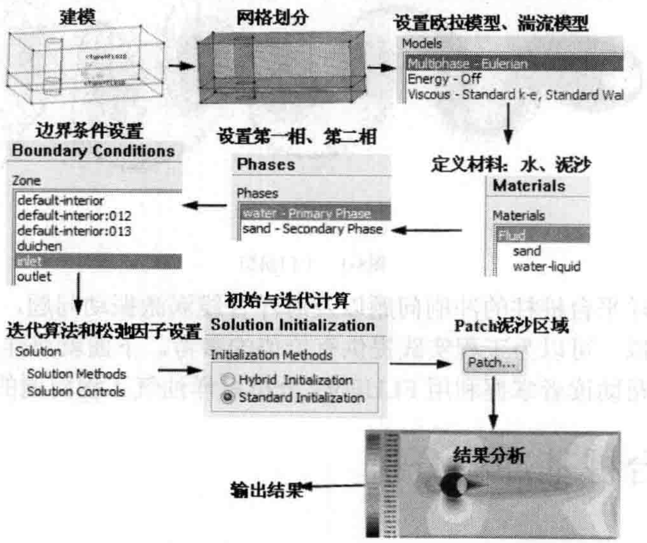


图8-5　海洋平台桩基冲刷分析流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch8\8-2.msh、8-2.cas、8-2.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch8\8-2.avi”文件。

8.2.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 10 和 5，Direction 选择为 XY Centered，单击 Apply 按钮，如图 8-6 所示，矩形中点与原点重合。

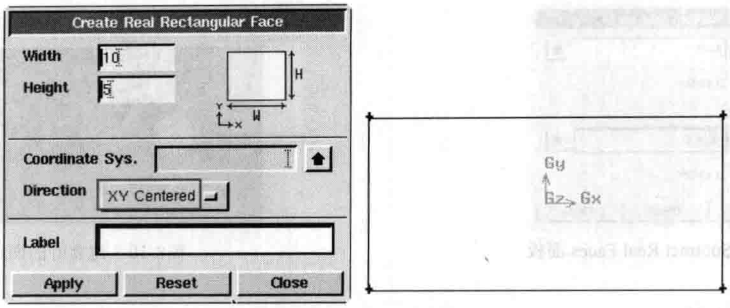


图8-6　矩形面绘制

2. 右击按钮，在弹出的下拉列表中单击按钮，如图 8-7 所示，在弹出的 Create Real Circular Face 面板的 Radius 中输入圆柱的半径 0.6，保持 Plane 为 XY 选项，单击 Apply 按钮，生成圆形区域。

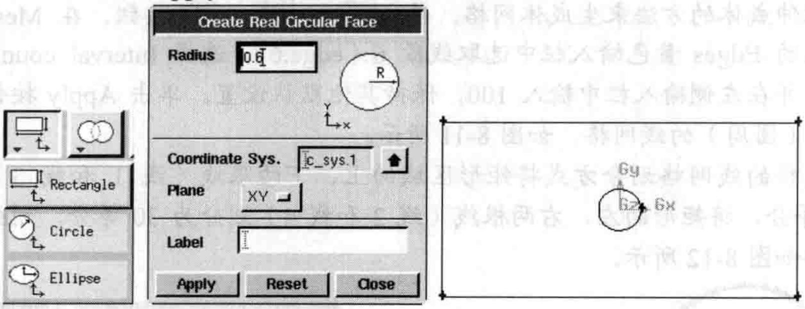


图8-7　圆面绘制

3. 此时的圆面是以原点为中点、半径为 0.6 的圆，需要将它移动至正确位置，即需要向 X 轴负向移动 2.5m。单击 Face 面板的（Move/Copy）命令，在弹出的图 8-8 所示的 Move/Copy Faces 面板中选取面 2（face.2），保持 Move 为红色选中状态，选择 Operation 下方的 Translate（平移），在 x 后输入–2.5 后单击 Apply 按钮，即完成了平移操作。

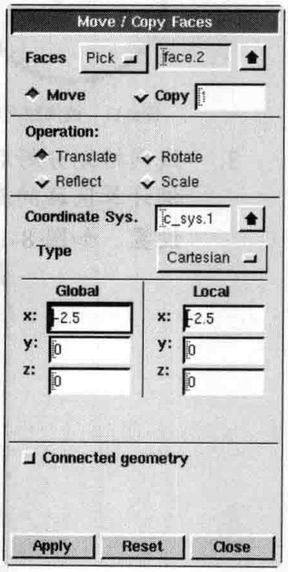


图8-8　Move/Copy Faces 面板

4. 此时仍有两个面，下面需要进行布尔减操作，以生成本例的计算区域。单击 Face 面板的按钮，在弹出的 Subtract Real Faces 面板的第一行 Face 中选取 face.1（矩形面域），在第二行 Faces 中选取 face.2（圆形面域），如图 8-9 所示，单击 Apply 按钮，完成布尔减操作。此时的图形窗口与原先一样，但是中间的面域已经被剪去。为了能够直观地观察到图形的变化，可以单击右下角视图控制面板中的按钮，这时就可以看到计算区域呈灰色显示，如图 8-10 所示。

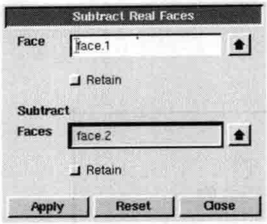


图8-9 Subtract Real Faces 面板

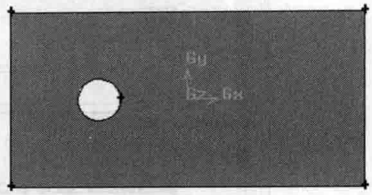


图8-10 建立好的面域

8.2.3 网格划分

1. 下面对计算区域进行网格划分。虽然本例的计算区域较简单，但网格划分采取分块划分时则比较复杂，这里我们采用非结构化网格划分方法，然后采用面拉伸成体的方法来生成体网格。单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选取线段 6（edge.6），选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 100，保持其他默认设置，单击 Apply 按钮生成线段 6（圆周）的线网格，如图 8-11 所示。
2. 用同样的线网格划分方式将矩形区域的上、下两跟线（线 1 和线 3）划分为 60 等分，将矩形的左、右两根线（线 2 和线 4）划分为 30 等分，划分好的线网格如图 8-12 所示。


图8-11 圆周线网格



图8-12 边界线的线网格

3. 线网格划分好后，单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中本例计算区域的面 1，以 Tri 和 Pave 的网格划分方式划分面网格，保持其他默认设置，如图 8-13 所示，单击 Apply 按钮生成面网格。

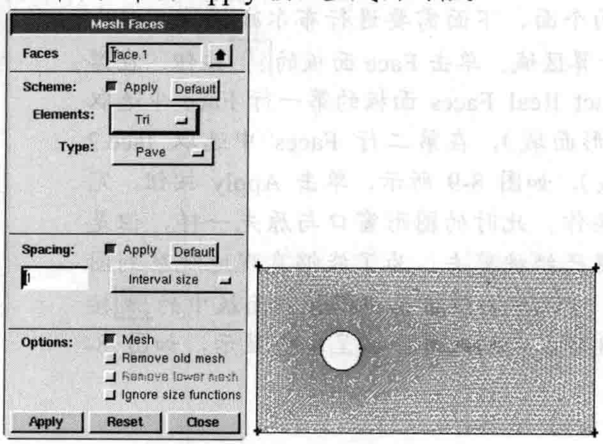


图8-13 面网格生成

4. 面网格划分好后，下面开始利用面拉伸成体的方法进行体网格的绘制。单击控制面板中的 → → 按钮，右击 按钮，在弹出的下拉列表中单击 按钮，如图 8-14 所示。弹出 Sweep Face 控制面板，如图 8-15 所示，在 Path 项中选中 Vector，弹出 Vector Definition 面板，选中 Magnitude，并输入值为 3，其他选项保持默认，单击 Apply 按钮，回到 Sweep Face 控制面板，选中 With mesh 选项，单击 Apply 按钮，即平面连同网格会向 Z 轴正方向拉伸 3m。

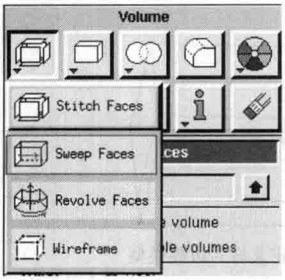


图8-14　选择扫掠面命令

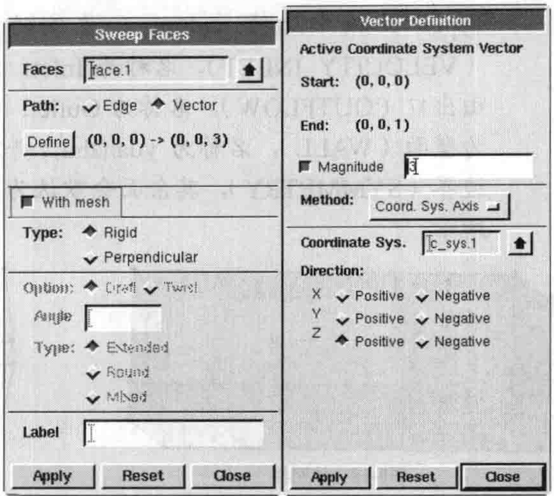
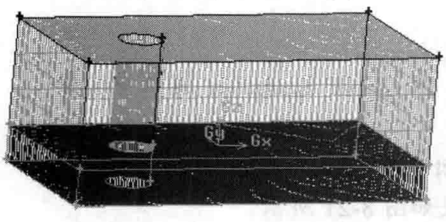
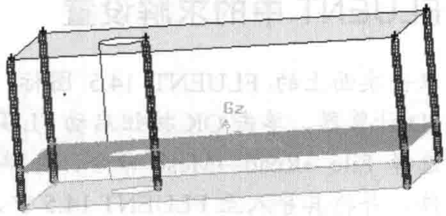


图8-15　扫掠设置

5. 由于海洋平台桩基有一部分在海底泥沙里，因此我们还需要绘制陷入泥沙部分的几何图形。按照同样的方法，向 Z 轴的负方向拉伸 1m。绘制好的模型如图 8-16 所示。

6. 由于在 Z 方向的节点数太少，严重影响网格整体质量，因此我们需要重新画 Z 轴方向的直线节点数。单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选取上部绿色部分网格的沿 Z 轴方向的直线 7、8、9、10、11（edge.7、edge.8、edge.9、edge.10、edge.11），其中包括上部分圆柱体上的一条直线，选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 30，保持其他默认设置，单击 Apply 按钮重新生成线网格。用同样的方法对下部蓝色的沿 Z 轴方向的直线 23、24、25、26、27 进行划分，并均匀划分为 15 段，如图 8-17 所示。


图8-16　拉伸后的模型


图8-17　重新划分好的 Z 向线网格

7. 单击 → → 按钮，重新进行体网格划分，在 Mesh Volumes 面板的

Volumes 中选中图形的上部分，即 volume.1，并在 Sources 中选择 volume.1 的顶面 face.7 和底面 face.1，其他设置保持默认，单击 Apply 按钮，volume.1 就会重新生成新的体网格，此网格划分法为 Cooper 法，即将复杂的工程机构自动分成多个逻辑柱体，对每一个逻辑柱体采用单向影射的方法生成结构化网格。用同样的方法对图形的下部分 volume.2 进行体网格划分。划分好的网格如图 8-18 所示。

8. 网格划分好后，下面定义边界类型。单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中选择 volume.1 左侧的面（face.3），定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 Inlet；定义 volume.1 右侧的面（face.5）为自由出口（OUTFLOW），名称为 Outlet；定义圆柱体的侧面（face.4 和 face.11）为壁面（WALL），名称为 yuanzhu；并定义 volume.1 的顶面（face.7）为对称边界（SYMMETRY），其余面会默认为 WALL 边界。定义好的边界如图 8-19 所示。

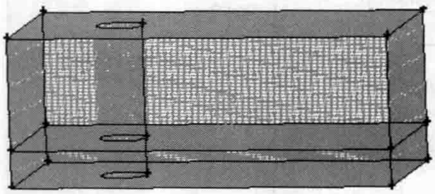


图8-18 体网格

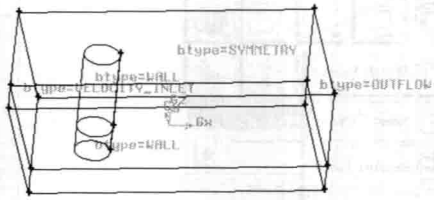


图8-19 定义好的边界类型

9. 为了方便在 FLUENT 中选中不同的体，我们需要将上下两部分进行单独命名。单击 → 按钮，弹出 Specify Continuum Types 面板，在 Name 中输入 Volume1，Type 中选择默认的 FLUID，并在 Entity 的 Volumes 中选中 Volume.1，单击 Apply 按钮。然后将 Volume.2 命名为 Volume2，划分流域。本模型被划分为 Volume1 和 Volume2 两个区域，均为流体，如图 8-20 所示。

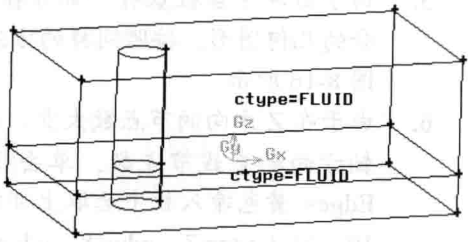


图8-20 区域介质定义

10. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 8-2.msh。

8.2.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 3D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。
2. 选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 8-2.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 14.5 中，网格加载如图 8-21 所示。
3. 在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。

4. 单击 Problem Setup 的 General 中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。

5. 单击左侧控制树中的 Models，双击 Multiphase-Off，弹出图 8-22 所示的 Multiphase Model 对话框，选择 Eulerian，设置 Volume Fraction Parameters 为 Implicit，并设置 Number of Eulerian Phases 为 2，单击 OK 按钮。

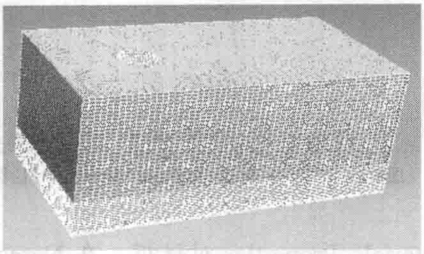


图8-21 导入后的网格显示

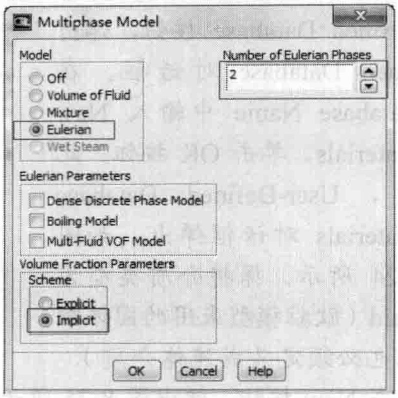


图8-22 Multiphase Model 对话框

6. 回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，选择 k-epsilon (2 eqn)，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮，如图 8-23 所示。

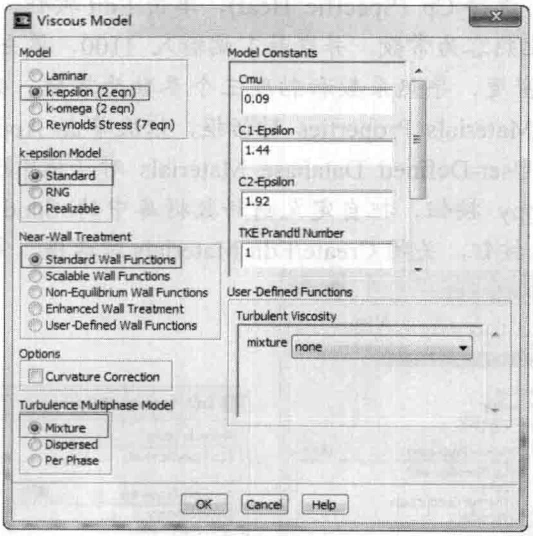


图8-23 Viscous Model 对话框

7. 这里我们需要使用的材料为水，故单击 Materials 面板的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。单击 Fluent Database... 按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表中的 water-liquid，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中来。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料列表中已经有水。

8. 下面定义本例海底泥沙的材料属性。单击左侧控制树中的 Materials，单击 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 User-Defined Database 按钮，弹出 Open Database 对话框。在 Database Name 中输入 New Materials，单击 OK 按钮。此时，User-Defined Database Materials 对话框弹出，如图 8-24 所示。保持介质类型为 fluid（欧拉模型采用的固体颗粒也必须定义成流体介质），单击 New 按钮，弹出图 8-25 所示的 Materials Properties 对话框，在 Name 中输入新材料的名称（此处输入 sand），Formula 化学式可以不输入。选择 Types 为 fluid，并从左侧 Available Properties 列表中选择 Cp (Specific Heat)、Density、Thermal Conductivity、Viscosity 四个参数到右侧 Material Properties 列表中。然后，选择 Cp (Specific Heat)，单击 Edit 按钮，弹出图 8-26 所示的对话框。选择比热容为常数，并在最下端输入 1100，单击 OK 按钮。采用同样的方法定义密度、导热系数和黏度三个参数为常数，分别为 2600、0.3、1.8e-05。回到 Materials Properties 对话框，依次单击 Apply 按钮和 Close 按钮，即可看到 User-Defined Database Materials 对话框中已经存在新材料——Sand，单击 Copy 按钮，把自定义材料数据库中的 Sand 调入到当前工程中来，单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框，完成材料定义设置。

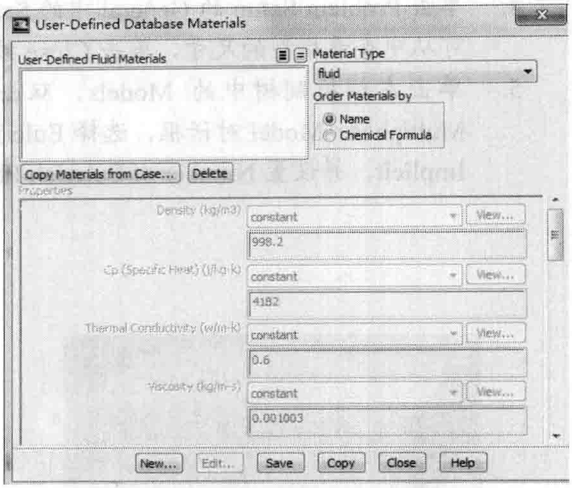


图8-24 User-Defined Database Materials 对话框

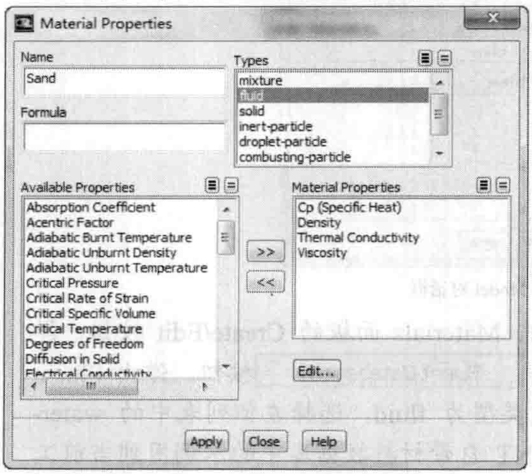


图8-25 Materials Properties 对话框

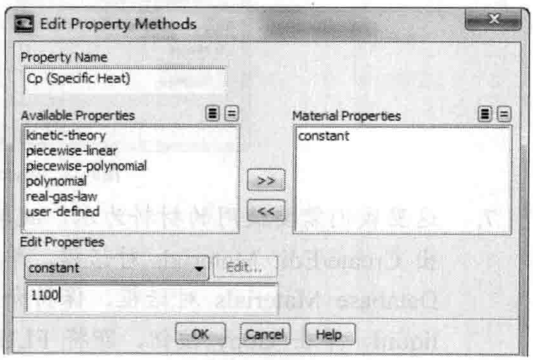


图8-26 定义比容

9. 接着，单击左侧控制树中的 Phases，双击 Phases 面板的 Phase-Primary Phase，

弹出图 8-27 所示的 Primary Phase 对话框，改变 Name 为 water，并选择 Phase Material（第一相材料）为水，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase，弹出图 8-28 所示的 Secondary Phase 对话框，改变 Name 为 Sand，并选择 Phase Material（第二相材料）为沙粒，设置其颗粒直径为 0.001m，单击 OK 按钮。

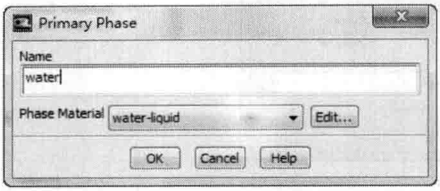


图8-27 第一相设置

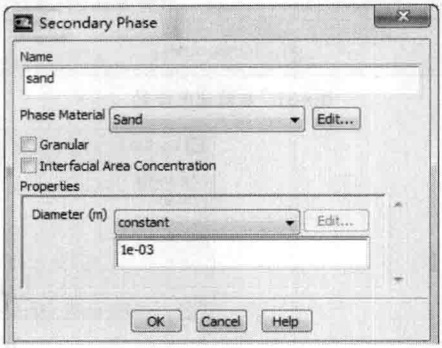


图8-28 第二相设置

10. 单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在 Boundary Conditions 面板中选择 Inlet，如图 8-29 所示，保持下方 Phase 中的选项为 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 8-30 所示。选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 5，Hydraulic Diameter(m)为 1.2，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 in，改变下方 Phase 中的选项为 water，单击 Edit 按钮，再次弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 8-31 所示。在 Velocity Magnitude(m/s)中输入 1，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 in，改变下方 Phase 中的选择为 sand，选择 Multiphase 子栏，见图 8-32，在 Volume Fraction 中输入 0，单击 OK 按钮。入口边界定义完后，在边界设置面板中选择 outlet，单击 Edit 按钮，弹出图 8-33 所示的 Outflow 对话框，输入 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。

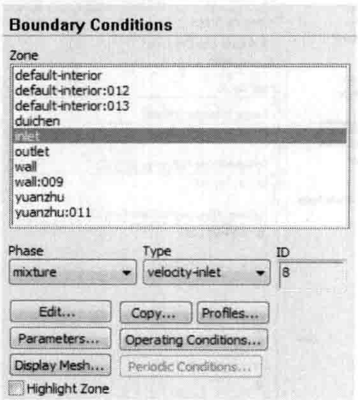


图8-29 边界设置面板

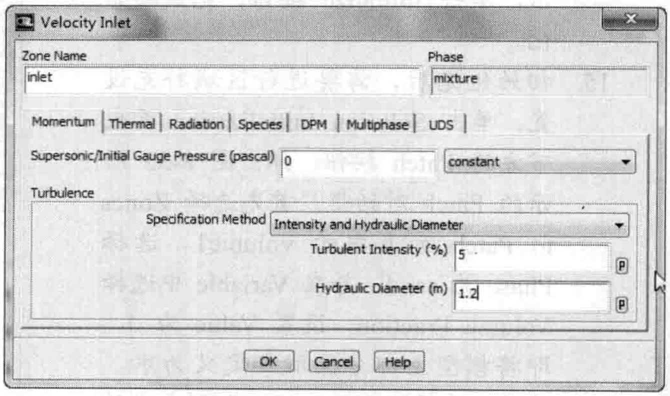


图8-30 速度入口全局设置

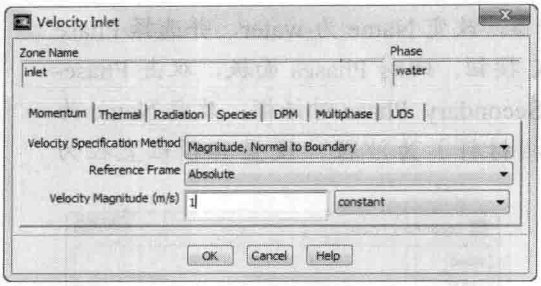


图8-31　水流速度设置

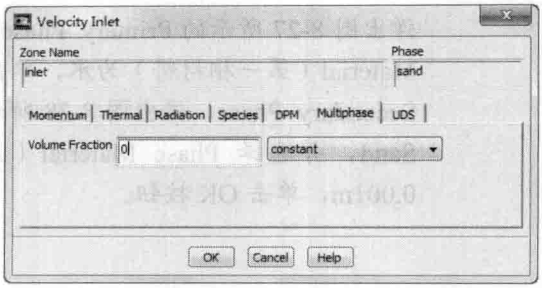


图8-32　入口泥沙量设置

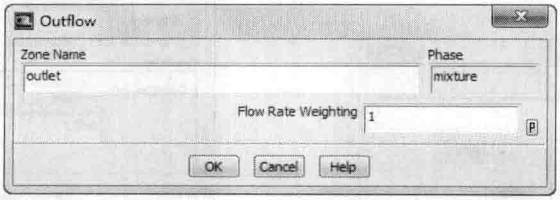


图8-33　出口设置

11. 边界定义完后，单击左侧控制树中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 控制面板，这里保持默认算法设置。
12. 单击左侧控制树中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 控制面板，设置 Volume Fraction 的松弛因子为 0.5，Pressure 和 Momentum 的松弛因子分别为 0.3 和 0.7，Turbulent Kinetic Energy 和 Turbulent Dissipation Rate 均为 0.8，其余各项均为 1。
13. 单击左侧控制树中的 Monitors，选择 “Residuals-Print, Plot”，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，设置所有项的收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。
14. 接着，单击左侧控制树中的 Solution Initialization，选择展开面板中的 Compute from 为 inlet，如图 8-34 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。
15. 初始化完后，需要进行区域补充设置。单击 Solution Initialization 面板下方的 Patch 按钮，弹出图 8-35 所示的 Patch 对话框。首先选择 Zones to Patch 列表中的 volume1，选择 Phase 为 sand，并在 Variable 中选择 Volume Fraction，设置 Value 为 0，即将模型上部分区域都定义为水。然后，选择 Zones to Patch 列表中的 volume2，仍选择 Phase 为 sand，并在 Variable 中选择 Volume Fraction，

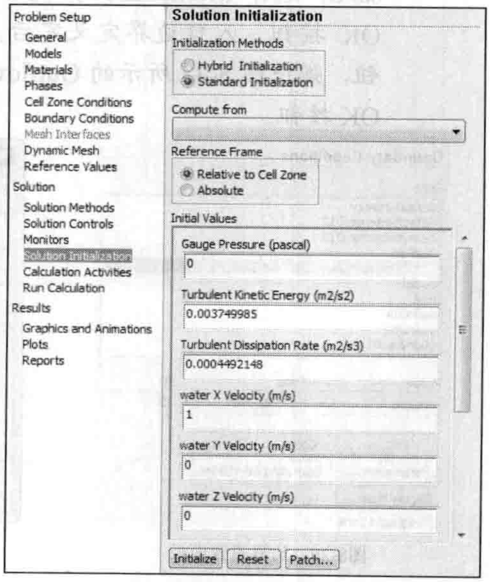


图8-34　初始化

这时设置 Value 为 1，即将模型下部分区域定义为泥沙，如图 8-36 所示。

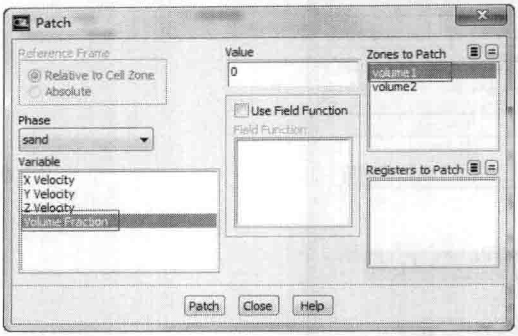


图8-35　上部分区域介质设置

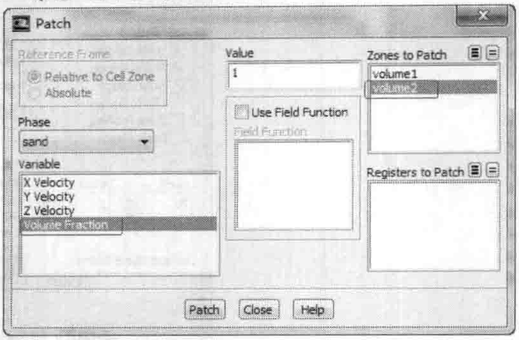


图8-36　下部分区域介质设置

16. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在 Run Calculation 控制面板中输入 Number of Iterations 为 800，单击 Calculate 按钮开始计算。

8.2.5　结果后处理与分析

1. 迭代结束后，为了显示模型上部海水的流动以及下部泥沙的冲刷情况，需要定义横向的剖面和纵向的剖面。选择 Surface→Iso-surface 命令，弹出图 8-37 所示的 Iso-Surface 对话框，在 Surface of Constant 下选择 Mesh 和 Y-Coordinate，并在 Iso-Values 下输入 0，New Surface Name 中输入 y=0，单击 Create 按钮，即在 y=0 处建立一个垂直于 Y 轴的 XZ 平面。同样，在 Surface of Constant 下选择 Mesh 和 Z-Coodinate，并在 Iso-Values 下输入 0，New Surface Name 中输入 z=0，单击 Create 按钮，即在 z=0 处建立一个垂直于 Z 轴的 XY 平面。此外，采用同样方法，在 z=2 处建立一个垂直于 Z 轴的 XY 平面。

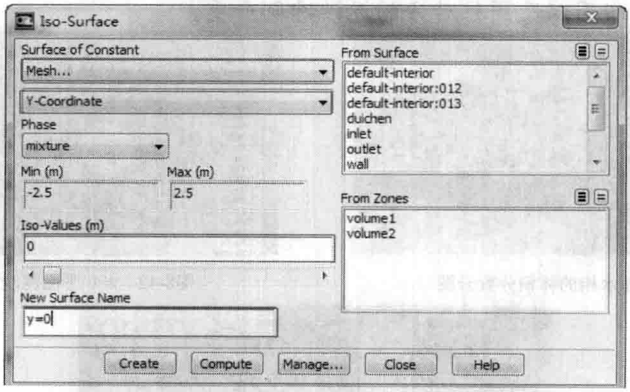


图8-37　Iso-Surface 对话框

2. 单击左侧控制树中的 Graphics and Animations，在展开的面板中双击 Contours，弹出图 8-38 所示的 Contours 对话框，选中 Options 下方的 Filled，选择 Contours of 中的 Velocity 和 Velocity Magnitude，选择 Phase 为 water，并在 Surfaces 中选择 z=0 和 z=2 面，单击 Display 按钮，可得到图 8-39 所示的水相速度云图。若改变 Phase 为 Sand，单击 Display 按钮，可得到图 8-40 所示的泥沙速度云图。

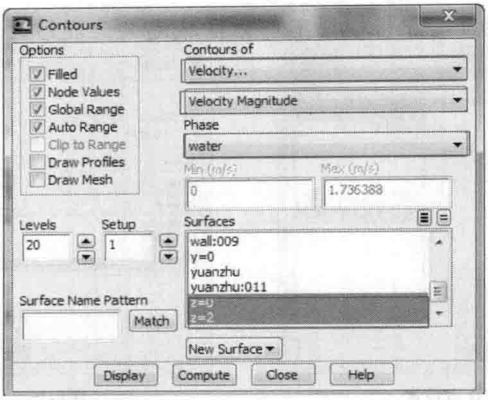


图8-38　Contours 对话框

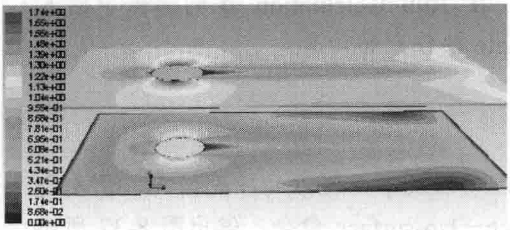


图8-39　水相速度云图

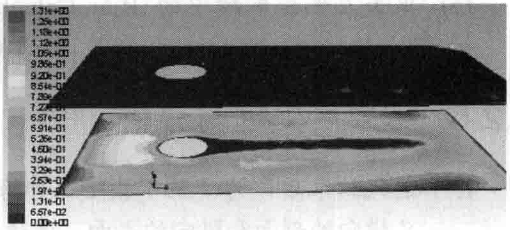


图8-40　泥沙速度云图

3. 改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Phases 和 Volume Fraction，选择 Phase 列表中的 water，并在 Surfaces 中选择 z=0，单击 Display 按钮，可得 z=0 平面水相的体积分数云图，如图 8-41 所示。改变 Phase 为 sand，可得泥沙的体积分数云图，如图 8-42 所示。在 Surfaces 中继续选择 y=0，单击 Display 按钮，可得 y=0 平面泥沙的体积分数云图，如图 8-43 所示。从图中我们可以明显看到，在圆柱四周以及圆柱后方的泥沙冲刷严重。

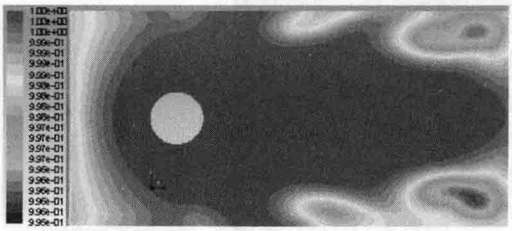


图8-41　z=0 平面水相的体积分数云图

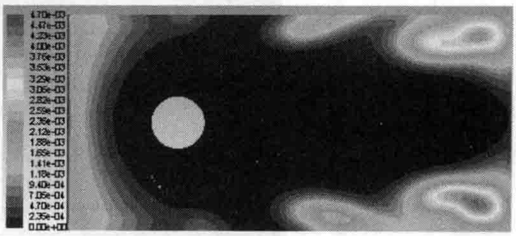


图8-42　z=0 平面泥沙的体积分数云图

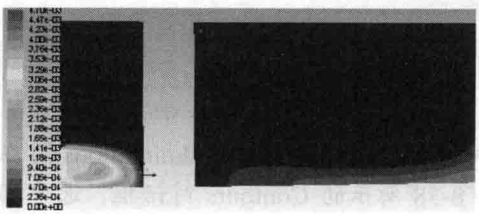


图8-43　y=0 平面泥沙的体积分数云图

4. 图形分析完后，选择 File→Write→Case&Data 命令，保存工程与数据结果文件（8-2.cas 和 8-2.dat）。

5. 选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

8.3 海洋立管绕流分析

海洋立管在油气开采阶段大量使用，然而，当海流流经海洋立管时，会在管柱后出现漩涡，并在柱前后形成压差，当漩涡的脱落频率与柱体的固有频率同阶时，就会导致柱体振动，这就是涡激振动。持续的涡激振动很容易导致海洋立管发生疲劳失效，对海洋油气安全生产的威胁是毋庸置疑的，因此有必要对其进行分析。

8.3.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

本例将模拟在一定雷诺数条件下产生卡门涡街时的海洋立管绕流现象。图 8-44 为本例的几何模型简图，其中立管直径为 0.3356m，计算区域为 1.5m×4.5m，圆柱位于图示位置，左侧流体入口速度为 0.5m/s，右侧出口为自由出流。若流体为水，其密度为 998.2kg/m^3，动力黏度为 0.001003kg/(m·s)，则雷诺数为 176949，为紊流流动。

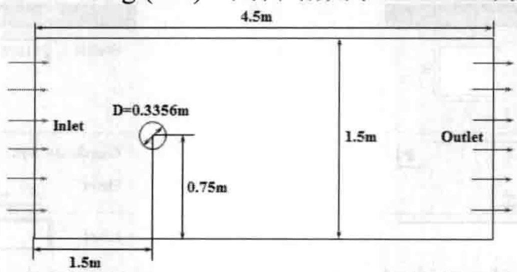


图8-44　海洋立管绕流几何模型简图

【思路分析】

本例在 Gambit 中建立一个矩形面，将其布尔减去一个圆面，即可得到计算区域，关键是网格划分要细致，尤其是柱体周围的网格应更紧密些。网格文件导入 FLUENT 后，设置非定常模型，并设置相应参数。需要注意的是参考值的设置，对于二维绕流问题，参考值中的 Area 和 Length 均设置为圆柱体的直径；对于非定常模型，还需要设置时间步长及合适的步数，整个计算流程如图 8-45 所示。

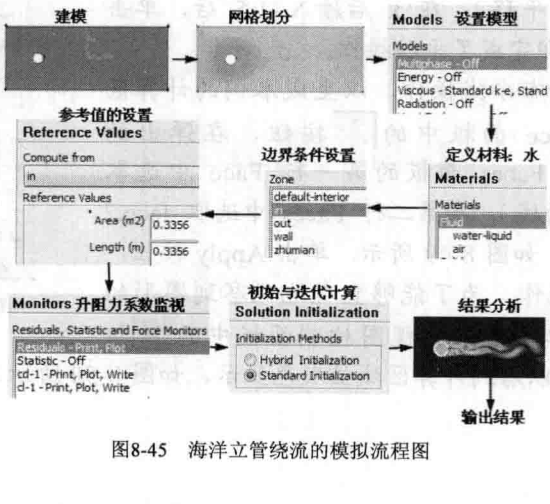


图8-45　海洋立管绕流的模拟流程图

第 8 章　海洋油气工程中的应用

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch8\8-3.msh、8-3.cas、8-3.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch8\8-3.avi”文件。

8.3.2 几何建模

1. 本例模型需要建立两个面域，然后进行布尔操作生成几何模型。启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 5 和 2，单击 Apply 按钮，如图 8-46 所示，矩形中点与原点重合。
2. 右击 按钮，在弹出的下拉列表中单击 按钮，在图 8-47 所示的 Create Real Circular Face 面板的 Radius 中输入圆柱的半径 0.1678，保持 Plane 为 XY 选项，单击 Apply 按钮。

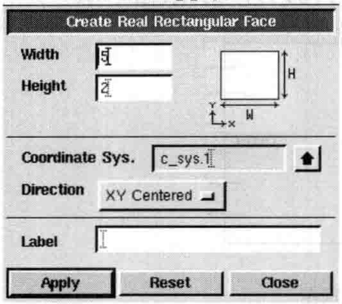


图8-46　长方形绘制面板

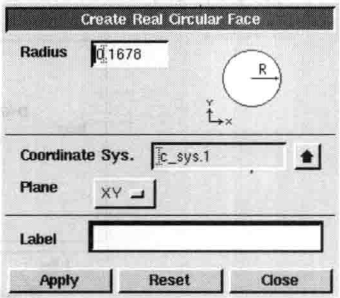


图8-47　圆形绘制面板

3. 此时的圆面是以原点为中点，半径为 0.1678m 的圆，需要将它移动至正确位置，即需要向 X 轴负向移动 1.5m。单击 Face 面板中的 （Move/Copy）按钮，在弹出的图 8-48 所示的 Move/Copy Faces 面板中选取面 2（face.2），保持 Move 为红色选中状态，选择 Operation 下方的 Translate（平移），在 x 后输入-1.5 后，单击 Apply 按钮，即完成了平移操作。
4. 下面需要进行布尔减操作，以生成本例的计算区域。单击 Face 面板中的 按钮，在弹出的 Subtract Real Faces 面板的第一行 Face 中选取 face.1（矩形面域），在第二行 Faces 中选取 face.2（圆形面域），如图 8-49 所示，单击 Apply 按钮，完成布尔减操作。为了能够直观地观察到图形的变化，可以单击右下角视图控制面板中的 按钮，这时就可以看到计算区域呈灰色显示，如图 8-50 所示。

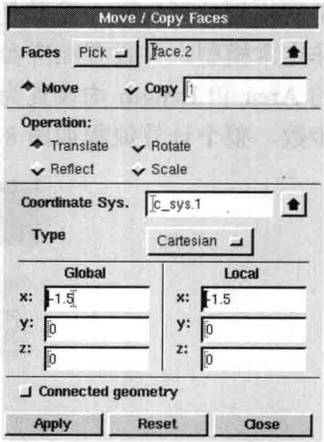


图8-48　Move/Copy Faces 面板

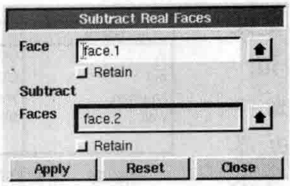


图8-49　Subtract Real Faces 面板

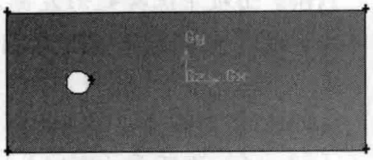


图8-50　计算区域示意图

8.3.3 网格划分

1. 下面对计算区域进行网格划分。虽然本例的计算区域较简单，但网格划分采取分块划分时则比较复杂，这里我们采用非结构化网格划分方法，同样可以生成高质量的网格。单击→→按钮，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选取线段 6（edge.6），选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 80，保持其他默认设置，单击 Apply 按钮生成线段 6（圆周）的线网格，如图 8-51 所示。
2. 用同样的线网格划分方式将矩形区域的上、下两跟线（线 1 和线 3）划分为 100 等分，将矩形的左、右两根线（线 2 和线 4）划分为 50 等分，划分好的线网格如图 8-52 所示。

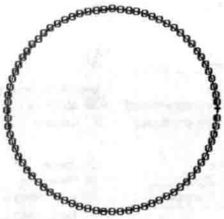


图8-51　圆周线的网格划分



图8-52　划分好的线网格

3. 线网格划分好后，单击→→按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中本例计算区域的面 1，以 Tri 和 Pave 的网格划分方式划分面网格，保持其他默认设置，如图 8-53 所示，单击 Apply 按钮生成图 8-54 所示的面网格。

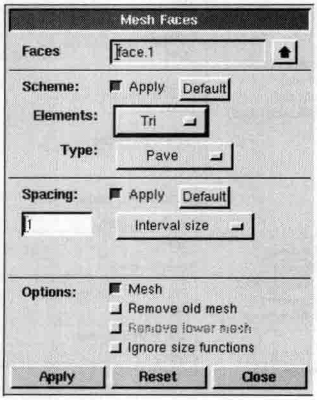


图8-53　Mesh Faces 面板

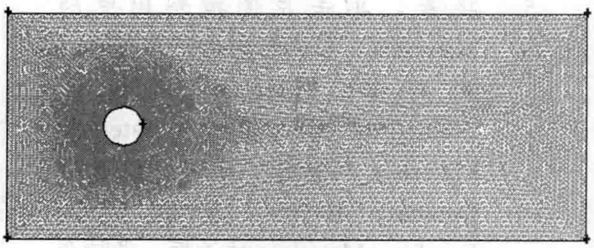


图8-54　划分好的面网格

4. 网格划分好后，下面定义边界类型。单击→按钮，在 Specify Boundary

Types 面板中选择矩形左侧入口线段（edge.4），定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 in；定义矩形右侧出口线段（edge.2）为自由出口（OUTFLOW），名称为 out；定义圆柱边界（edge.6）为壁面（WALL），名称为 zhumian；其余矩形的上下边界定义为对称边界（SYMMETRY），默认为 Wall 边界。定义好的边界如图 8-55 所示。

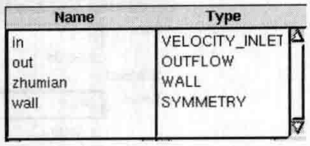
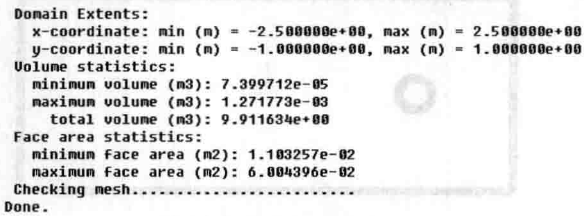


图8-55　定义好的边界类型

5. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 8-3.msh。

8.3.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT。选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 8-3.msh 文件，将其导入至 FLUENT 14.5 中。
2. 单击 General 控制面板 Mesh 中的 Check 按钮，检查网格，待文本窗口中出现“Done”语句，表示模型网格合适，如图 8-56 所示。
3. Solver 下方为基本模型设置选项，这里需要选择 Time 下方的 Transient，以启动非定常模型，其余保持默认设置，如图 8-57 所示。


```
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -2.500000e+00, max (m) = 2.500000e+00
  y-coordinate: min (m) = -1.000000e+00, max (m) = 1.000000e+00
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 7.399712e-05
  maximum volume (m3): 1.271773e-03
    total volume (m3): 9.911634e+00
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 1.103257e-02
  maximum face area (m2): 6.004396e-02
Checking mesh.........................
Done.
```
图8-56　检查网格

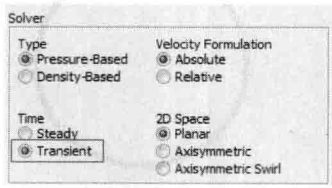


图8-57　启动非定常模型

4. 单击左侧控制树中的 Models，双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 8-58 所示，选择 k-epsilon (2 eqn)，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。
5. 接着，单击左侧控制树中的 Materials，本例的流动介质为水，故单击 Materials 面板的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。单击 FLUENT Database 按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表中的 water-liquid，单击 Copy 按钮。

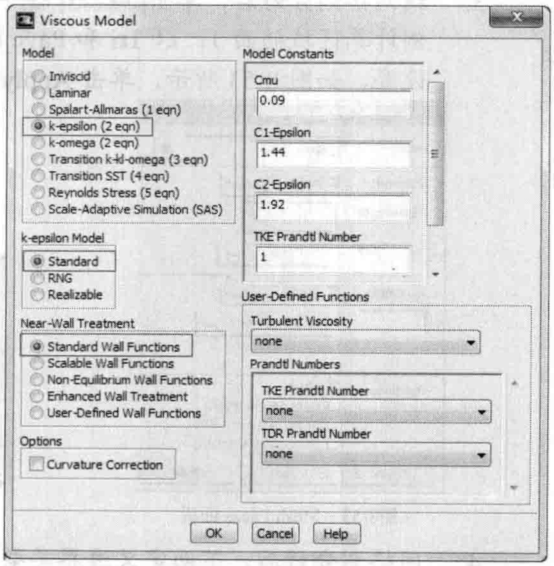


图8-58　选择湍流模型

回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。

6. 单击左侧控制树中的 Cell Zone Conditions，展开 Cell Zone Conditions 控制面板，单击 Edit 按钮，选择 Material Name 右侧列表中的 water-liquid，单击 OK 按钮。
7. 单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里我们保持默认设置，单击 OK 按钮。
8. 单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在 Boundary Conditions 面板中选择 inlet，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude（m/s）为 0.5，Specification Methods 为 Intensity and Hydraulic Diameter，并设置 Turbulent Intensity（%）为 5，Hydraulic Diameter（m）为 0.3356，即圆柱直径，如图 8-59 所示，单击 OK 按钮。接着，选中 Boundary Conditions 面板列表中的 out，单击 Edit 按钮，弹出 Outflow 对话框，保持 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。

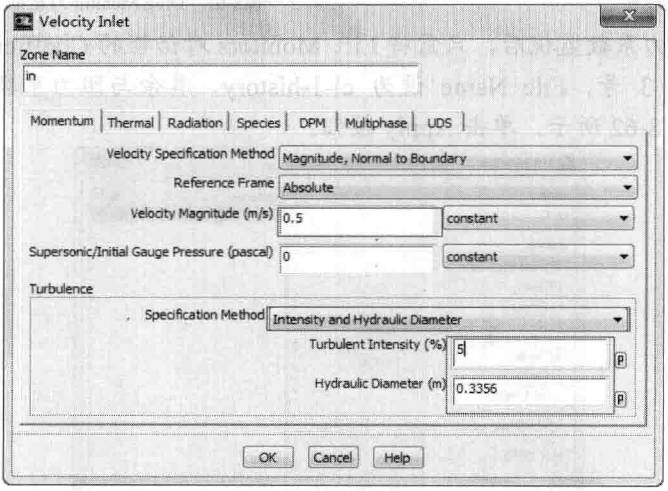


图8-59　速度入口设置

9. 边界定义完后，单击左侧控制树中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 控制面板，这里保持默认算法设置。单击 Solution 中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 面板，也保持默认设置。
10. 接下来设置升力与阻力系数监视器。为确保其精确性，在这之前首先需要设置参考值。选择 Report→Reference Values 命令，在 Compute from 下拉列表中选择 in，并在 Area (m2)和 Length (m)右侧均输入圆柱的直径 0.3356，保持 Reference Zone 为 fluid，单击 OK 按钮，如图 8-60 所示。
11. 单击左侧控制树中的 Monitors，选择“Residuals-Print, Plot”，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，设置所有项的收敛精度均为 0.00001，单击 OK 按钮。
12. 单击 Create 下拉按钮，选择 Drag，弹出 Drag Monitor 对话框，选中 Options 中的 Print to Console、Plot 和 Write 三个选项，选取 Wall Zones 里的 zhumian，然后将 File Name 设为 cd-1-history，如图 8-61 所示，单击 Apply 按钮。

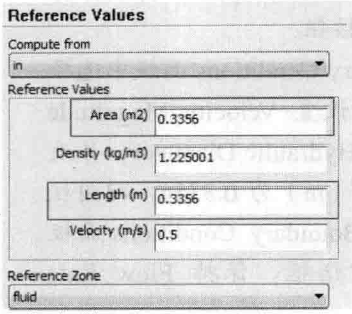


图8-60 参考值设置

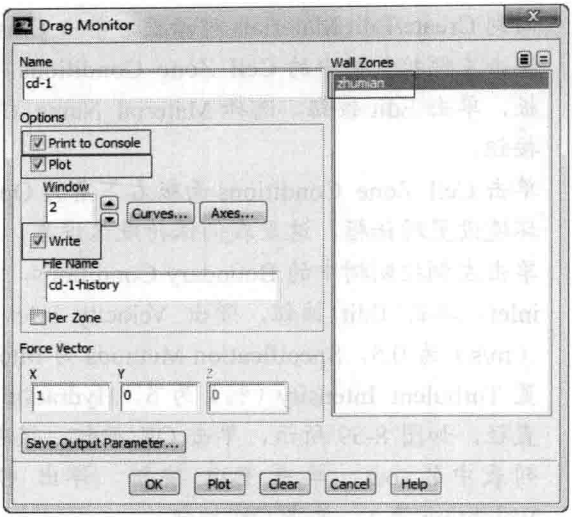


图8-61 Drag Monitor 对话框

13. 设置完阻力系数监视后，只需将 Lift Monitors 对话框的 Coefficient 选为 Lift，窗口设为 3 号，File Name 设为 cl-1-history，其余与阻力系数监视器设置一致，如图 8-62 所示，单击 Apply 按钮。



图8-62 Lift Monitor 操作面板

14. 接着，单击左侧控制树中的 Solution Initialization，选择展开面板中的 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

15. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在图 8-63 所示的面板中输入 Number of Time Steps 为 1000，设置 Time Step Size (s)为 0.01，Time Stepping Method 为 Fixed，并输入 Max Iterations/ Time Step 为 30，单击 Calculate 按钮开始计算。图 8-64 和图 8-65 所示为监测得到的圆柱面阻力和升力系数曲线。

提示：对于非定常模型的数值模拟，为了观测不同时刻的模型内部流场变化情况，根据需要每隔一定步长自动保存，在左侧控制树中单击 Calculation Activities，在控制面板中的 Autosave Every（Time Step）中设置相应的步数，即每隔多少步长系统就会自动保存相应的 Dat 文件，便于后期观察相应的模型内部流场变化。

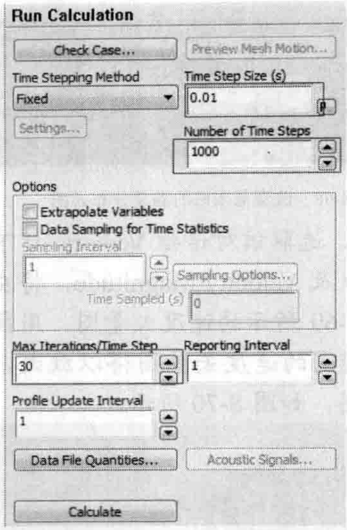


图8-63 时间步长设置面板

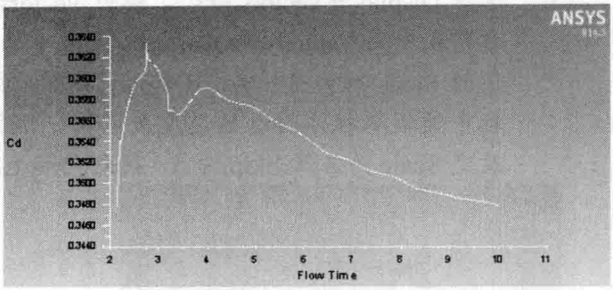


图8-64 圆柱面的阻力系数曲线

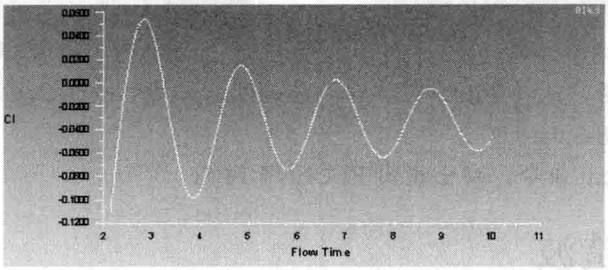


图8-65 圆柱面的升力系数曲线

8.3.5 结果后处理与分析

1. 选择Display→Contours命令，在Contours对话框中选择Contours of下拉列表中的Velocity和Velocity Magnitude，并选中Options中的Filled，单击Display按钮，得到10s后的速度分布云图，如图8-66所示。

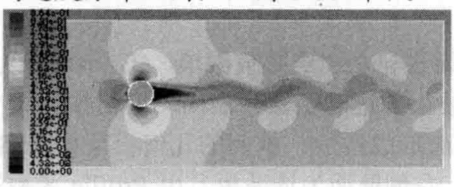


图8-66 速度分布云图

2. 改变Contours of下拉列表中的选项为Velocity和Vorticity Magnitude，再次单击Display按钮，得到10s后的涡量分布云图，如图8-67所示。若取消Contours对话框中的Auto Range，设置Min (1/s)为0，Max (1/s)为4，单击Display按钮，则得到涡量值在0~4范围内的涡量分布云图，如图8-68所示。可见，缩小涡量值范围的显示区间，可以更加清晰地看到圆柱体后的漩涡脱落情况。

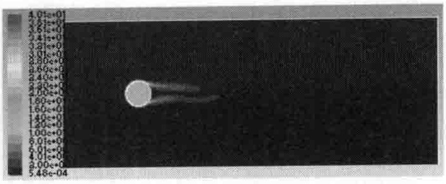


图8-67 涡量分布云图

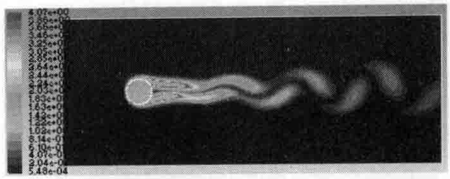


图8-68 改变范围后的涡量分布云图

3. 选择Display→Vectors命令，弹出Vectors对话框，选取该对话框Vectors of下方列表中的Velocity和Color by列表中的Velocity及Velocity Magnitude，将左侧的Scale改为2，单击Display按钮，得到图8-69所示的速度矢量图。用鼠标中键框取柱体附近的速度矢量图，则该局部范围的速度矢量图得以放大，改变Scale为3及Skip为5，得到局部速度矢量图，如图8-70所示。

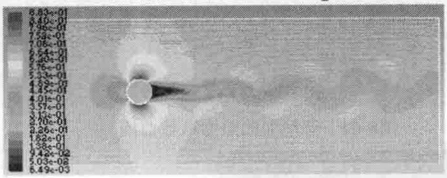


图8-69 速度矢量图

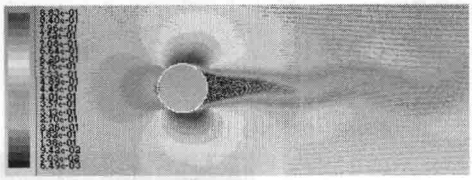


图8-70 速度矢量图局部放大显示

4. 图形分析完后，选择File→Write→Case&Data命令，保存工程与数据结果文件（8-3.cas和8-3.dat）。
5. 选择File→Exit命令，安全退出FLUENT 14.5。

8.4 二维数值造波

波浪是海洋环境中最复杂多变的，至今尚无精确的波浪理论能够解析波浪的运动规律。数值造波技术是近年来兴起的一种模拟波浪运动的数值仿真方法，以线性波、孤立波等模拟居多。

8.4.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

本例采用推板造波法，旨在建立二维数值波浪，第一个波浪为孤立波，第二个波浪为破碎波。利用Profile编写造波板的运动函数，启用动网格模型及非定常模型。在造波板的推动下，水面将产生起伏，从而形成波浪。本例的几何模型如图8-71所示，长为8m，高为2m，初始水面高度为0.5m。左侧壁面为造波板，由Profile函数控制其运动，右侧和底部为壁面边界，上部为压力进口边界（1atm）。

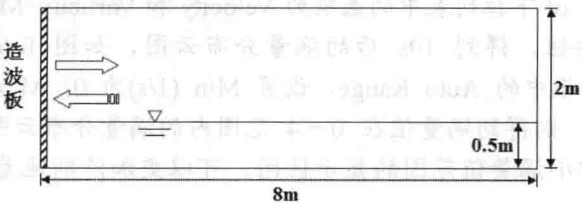


图8-71 二维数值造波几何模型简图

【思路分析】

本例模型较为简单，为二维矩形，网格划分时要记录网格单元尺寸，以备动网格参数设置时使用。在 FLUENT 设置前，首先用记事本编辑控制造波板运动的 Profile 函数，然后在 FLUENT 中读入该函数，再在动网格设置时调用。本例的计算流程如图 8-72 所示。

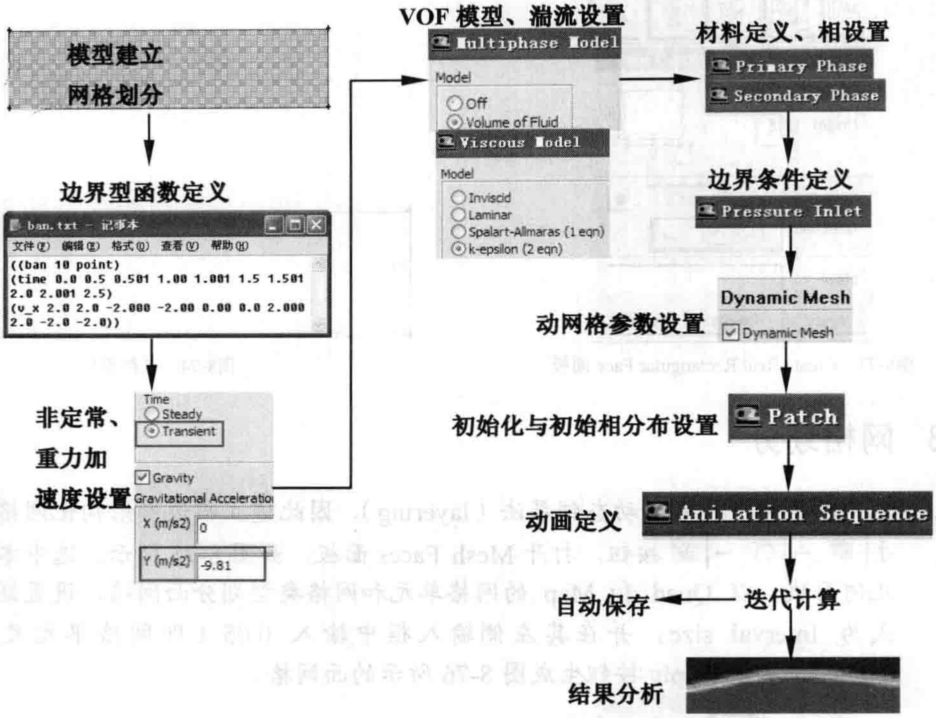


图8-72　二维数值造波模拟流程

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch8\8-4.msh、8-4.cas、8-4-0.2s.cas、8-4-0.4s.cas、8-4-0.6s.cas、8-4-0.8s.cas、8-4-1.0s.cas、8-4-1.2s.cas、8-4-1.4s.cas、8-4-1.6s.cas、8-4-1.8s.cas、8-4-2.0s.cas、8-4-2.2s.cas、8-4-2.4s.cas、8-4-2.5s.cas、8-4-0.2s.dat、8-4-0.4s.dat、8-4-0.6s.dat、8-4-0.8s.dat、8-4-1.0s.dat、8-4-1.2s.dat、8-4-1.4s.dat、8-4-1.6s.dat、8-4-1.8s.dat、8-4-2.0s.dat、8-4-2.2s.dat、8-4-2.4s.dat、8-4-2.5s.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch8\8-4.avi”文件。

8.4.2 几何建模

本例只需要建立一个面域。启动 Gambit，单击控制面板中的 → → 按钮，弹出图 8-73 所示的 Create Real Rectangular Face 面板，在该面板的 Width 和 Height 中分别输入 8 和 2，并选择 Direction 为+X +Y（即表示以原点为左下角端点，向 X 轴和 Y 轴正向生成面域）单击 Apply 按钮，生成的几何模型如图 8-74 所示。

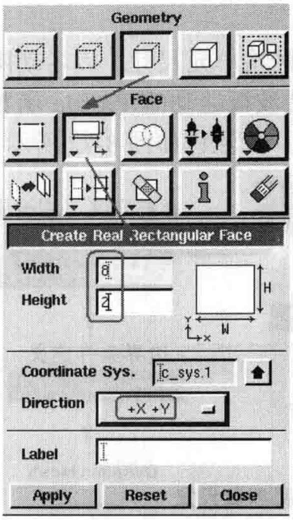


图8-73　Create Real Rectangular Face 面板

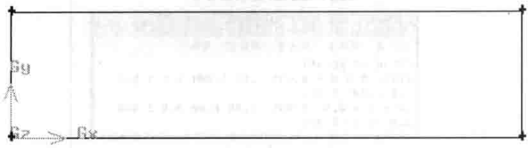


图8-74　几何面域

8.4.3　网格划分

1. 本例动网格中将采用动态铺层法（layering），因此建立四边形结构化网格。单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，如图 8-75 所示，选中本例的几何面域，以 Quad 和 Map 的网格单元和网格类型划分面网格，设置划分方式为 Interval size，并在其左侧输入框中输入 0.05（即网格单元尺寸为 0.05m），单击 Apply 按钮生成图 8-76 所示的面网格。

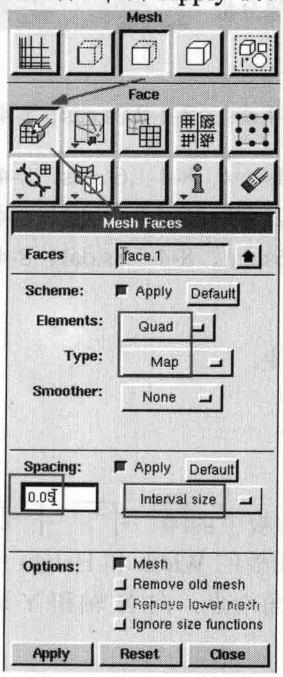


图8-75　Mesh Faces 面板

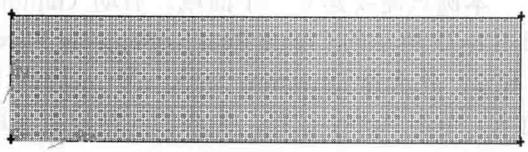


图8-76　面网格

2. 定义边界类型。单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中选择矩形的左侧线段（edge.4），定义为壁面边界（WALL），名称为 ban；定义矩形的右侧线段（edge.2）为壁面边界（WALL），名称为 you；定义矩形的下边界（edge.1）也为壁面（WALL），名称为 xia；定义矩形的上边界为压力进口边界（PRESSURE_INLET），名称为 shang。定义好的边界如图 8-77 所示。

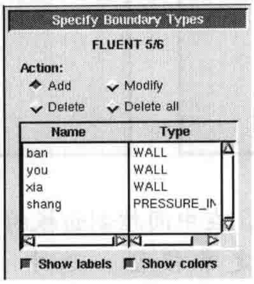


图8-77 定义好的边界

3. 选择 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 8-4.msh。

提示：为了简化计算，这里的右边界也设置为壁面边界。实际造波计算载荷时，应考虑右侧采用消波装置，如设置多孔介质或使用 UDF。

8.4.4 FLUENT 中的求解设置

1. 在 FLUENT 求解设置前，打开一个空白的记事本文件，输入如下边界型函数，如图 8-78 所示。然后保存为 ban.txt，并把该文件放在工作目录下。

```
((ban 10 point)
(time 0.0 0.5 0.501 1.00 1.001 1.5 1.501 2.0 2.001 2.5)
(v_x 2.0 2.0 -2.000 -2.00 0.00 0.0 2.000 2.0 -2.0 -2.0))
```

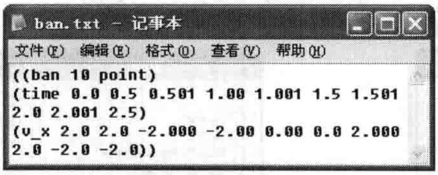


图8-78 边界型函数定义

2. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，并选中 Display Options 下方的 Display Mesh After Reading 选项（即导入网格文件后会在 FLUENT 图形窗口中显示网格），如图 8-79 所示，单击 OK 按钮启动 FLUENT。选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 8-4.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 14.5 中。
3. 单击 General 控制面板 Mesh 中的 Check 按钮，检查网格，待文本窗口中出现“Done”语句，表示模型网格合适。
4. 单击 Problem Setup 的 General 中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸。这里我们可以看到几何模型在 X 轴长为 8m，Y 轴高为 2m，如图 8-80 所示。单击 Close 按钮关闭该对话框。

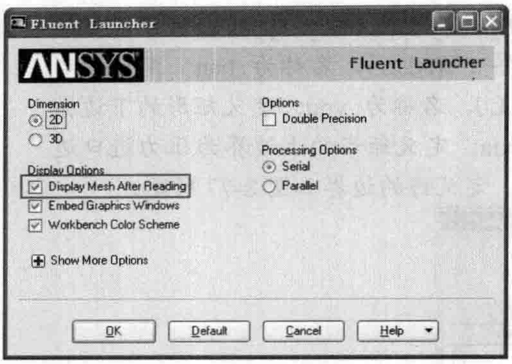


图8-79 FLUENT 启动窗口

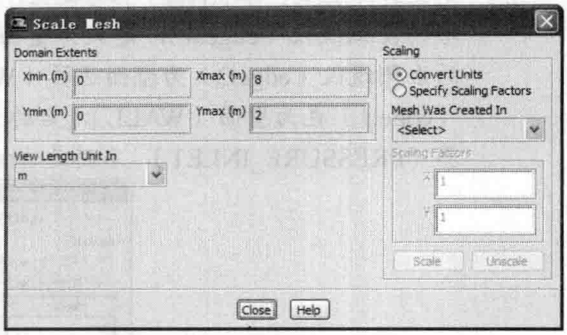


图8-80 Scale Mesh 对话框

5. 单击左侧控制树的 General，在中间控制面板的 Solver 下方，选中 Time 下方的 Transient，以启动非定常模型。选中 Gravity，在展开的 Gravitational Acceleration（重力加速度设置）中，输入 Y 方向的数值为–9.81，表示重力沿 Y 轴负向，如图 8-81 所示。

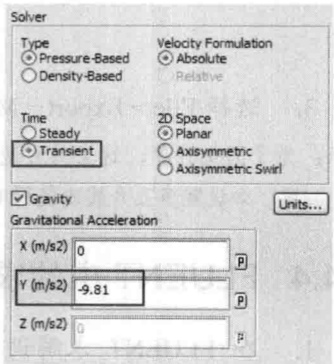


图8-81 非定常模型设置与重力加速度设置

6. 单击左侧控制树中的 Models，双击 Multiphase-Off，弹出图 8-82 所示的 Multiphase Model 对话框，选择 Volume of Fluid，设置 Number of Eulerian Phases 为 2，设置 Scheme 为 Explicit，保持其余默认设置，单击 OK 按钮。

7. 接着，回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，弹出 Viscous Model 对话框，如图 8-83 所示。选择 k-epsilon (2 eqn)，并选择 k-epsilon Model 为 Realizable，保持其默认参数设置，单击 OK 按钮。

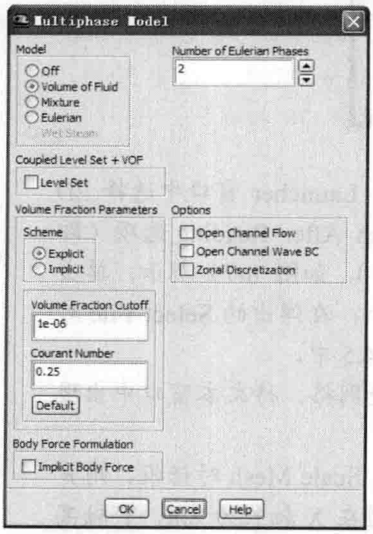


图8-82 Multiphase Model 对话框

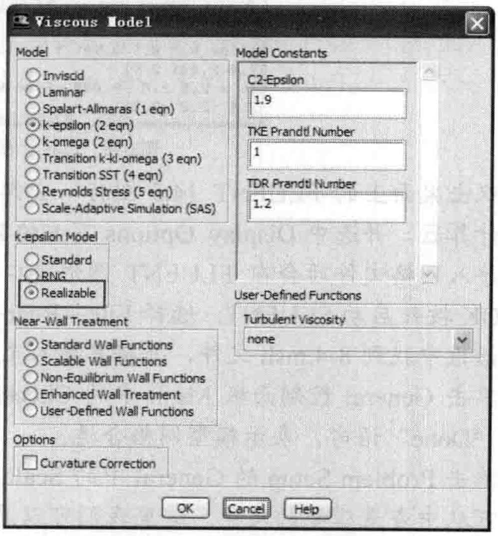
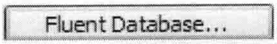


图8-83 Viscous Model 对话框

8. 然后，我们调用 FLUENT 自带数据库中的材料——水。单击左侧控制树中的 Materials，在中间的控制面板中单击 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。单击 

按钮，弹出 Fluent Database Materials 对话框，如图 8-84 所示。保持介质类型为 fluid，选择左侧列表中的 water-liquid (h2o<l>)，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中来。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料列表中已经有水。

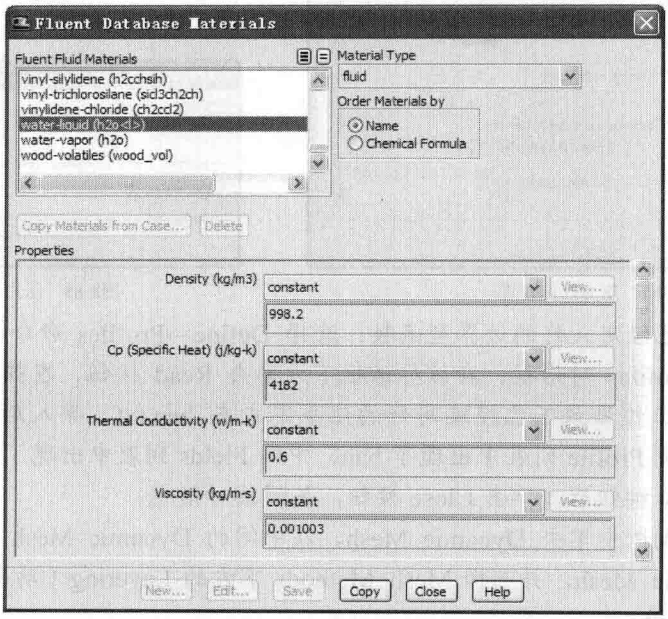


图8-84　Fluent Database Materials 对话框

9. 接着，单击左侧控制树中的 Phases，双击 Phases 面板的 Phase-Primary Phase，弹出图 8-85 所示的 Primary Phase 对话框，改变 Name 为 water，并选择 Phase Material（第一相材料）为水，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase，弹出图 8-86 所示的 Secondary Phase 对话框，改变 Name 为 air，并选择 Phase Material（第二相材料）为 air，单击 OK 按钮。

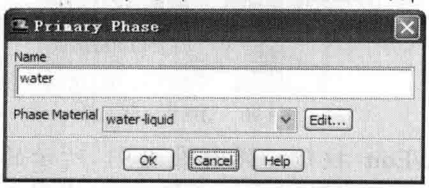


图8-85　第一相设置

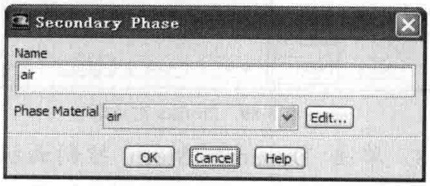


图8-86　第二相设置

10. 单击左侧控制树中的 Boundary Conditions，在 Boundary Conditions 面板中选择 shang，保持下方 Phase 中的选项为 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 8-87 所示。选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 0.001，Hydraulic Diameter(m)为 4，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 shang，改变下

方 Phase 中的选项为 air，单击 Edit 按钮，再次弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 8-88 所示。选择 Multiphase 选项卡，在 Volume Fraction 中输入 1，单击 OK 按钮。

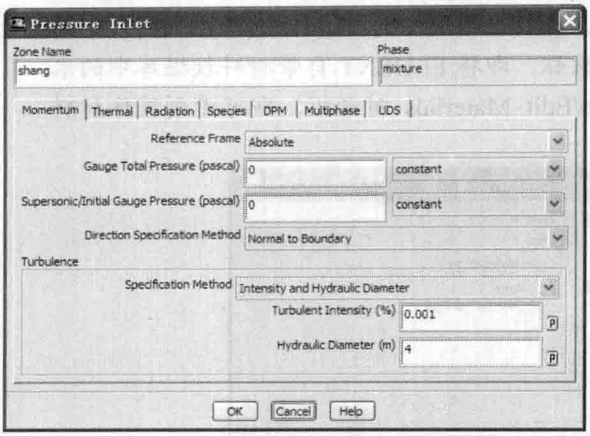


图8-87　压力入口设置

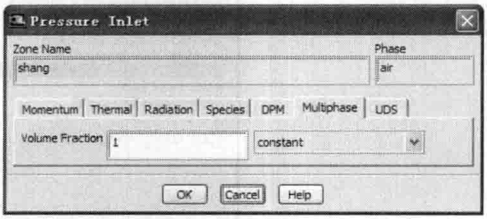


图8-88　压力入口气相设置

11. 下面导入已经定义好的边界型函数。选择 Define→Profiles 命令，弹出图 8-89 所示的 Profiles 对话框，在该对话框下方单击 Read 按钮，在弹出的选择对话框中选择工作目录下已经编写好的记事本文本 ban.txt，导入后如图 8-89 所示，在左侧 Profile 列表中出现了 ban，中间 Fields 列表中出现了 time 和 v_x，单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮，关闭该对话框。
12. 在左侧控制树中单击 Dynamic Mesh，在中间的 Dynamic Mesh 控制面板中选中 Dynamic Mesh，并选择 Mesh Methods 下方的 Layering（动态铺层法），如图 8-90 所示。

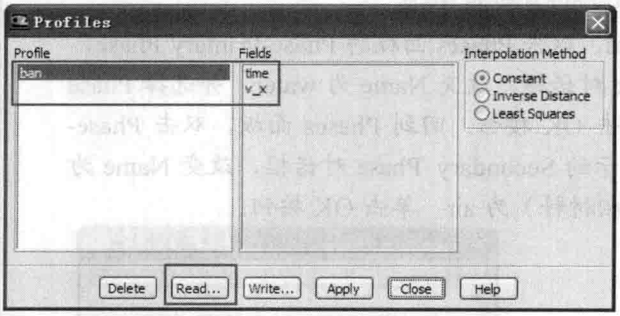


图8-89　Profiles 对话框

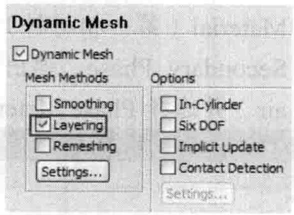


图8-90　动网格方法选择

13. 单击 Dynamic Mesh 控制面板中的 Create/Edit 按钮，弹出图 8-91 所示的 Dynamic Mesh Zones 对话框，在 Zone Names 中选择 ban，选择 Type 类型为 Rigid Body（表示为刚体运动），然后在 Motion Attributes 选项卡中，选择 Motion UDF/Profile 为 ban（已经导入的边界型函数）。接着选择 Meshing Options 选项卡，如图 8-92 所示，在 Cell Height (m)中输入 0.05，即表示与运动刚体接触的网格尺寸为 0.05m，单击 Create 按钮，生成动网格的运动边界，在 Dynamic Mesh Zones 列表中将出现 ban。

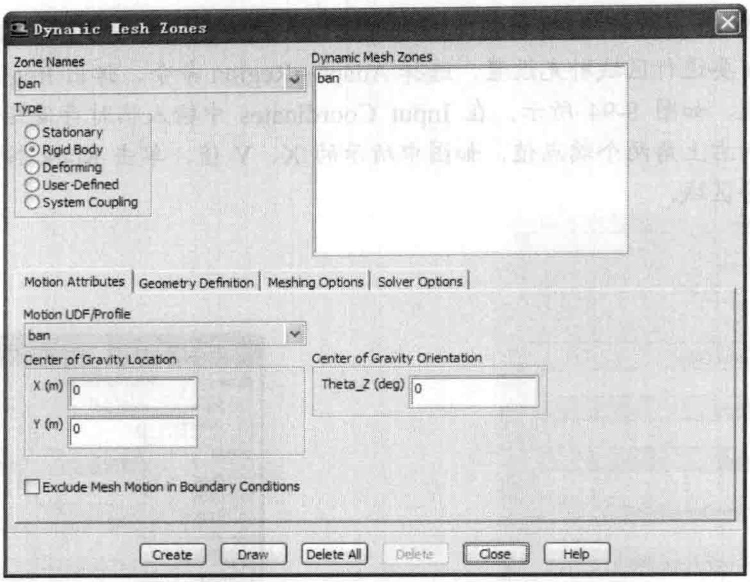


图8-91　Dynamic Mesh Zones 对话框

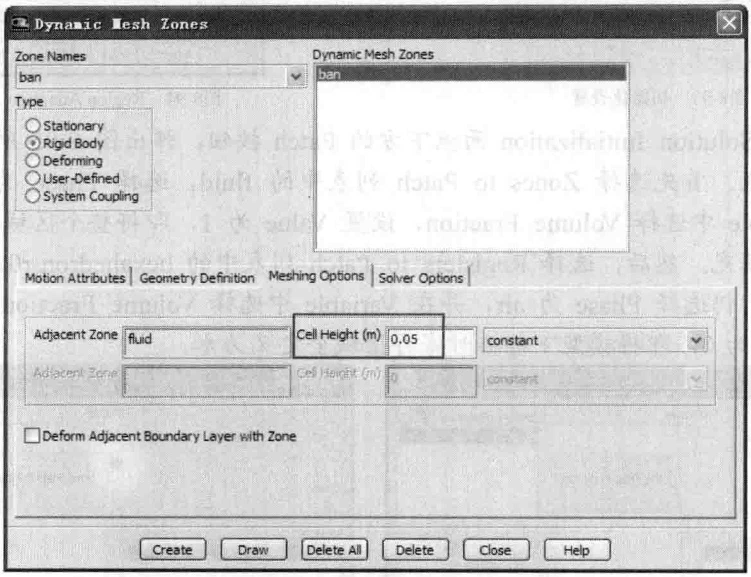


图8-92　动边界相邻网格尺寸大小设置

14. 边界定义完后，单击左侧控制树中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 控制面板，这里保持默认算法设置。
15. 单击左侧控制树中的 Solution Controls，展开 Solution Controls 控制面板，设置 Pressure 和 Momentum 的松弛因子分别为 0.3 和 0.7，Turbulent Kinetic Energy 和 Turbulent Dissipation Rate 均为 0.8，其余各项均为 1。
16. 单击左侧控制树中的 Monitors，选择“Residuals-Print, Plot”，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，设置所有项的收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。
17. 接着，单击左侧控制树中的 Solution Initialization，选择展开面板中的 Compute

from 为 all-zones，如图 8-93 所示，单击 Initialize 按钮，进行初始化。

18. 这里需要进行区域补充设置，选择 Adapt→Region 命令，弹出 Region Adaption 对话框，如图 8-94 所示。在 Input Coordinates 中输入临时存储矩形区域的左下角和右上角两个端点值，如图中所示的 X、Y 值，单击 Mark 按钮即生成临时寄存区域。

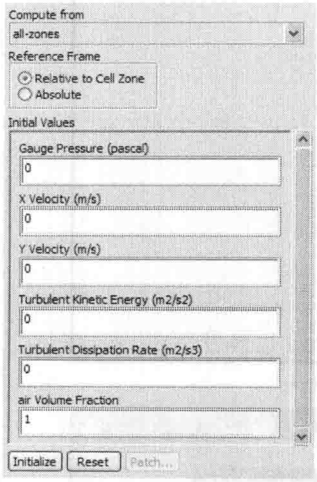


图8-93　初始化设置

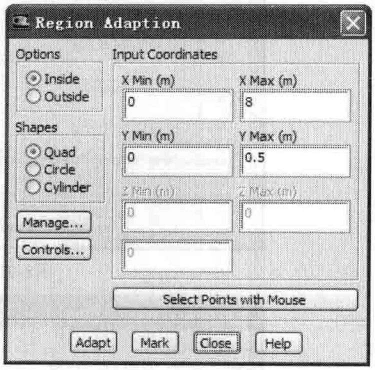


图8-94　Region Adaption 对话框

19. 单击 Solution Initialization 面板下方的 Patch 按钮，弹出图 8-95 所示的 Patch 对话框。首先选择 Zones to Patch 列表中的 fluid，选择 Phase 为 air，并在 Variable 中选择 Volume Fraction，设置 Value 为 1，即将整个区域都先定义为空气填充。然后，选择 Registers to Patch 列表中的 hexahedron-r0，如图 8-96 所示，仍选择 Phase 为 air，并在 Variable 中选择 Volume Fraction，这时设置 Value 为 0，即将模型下部临时寄存区域全定义为水。

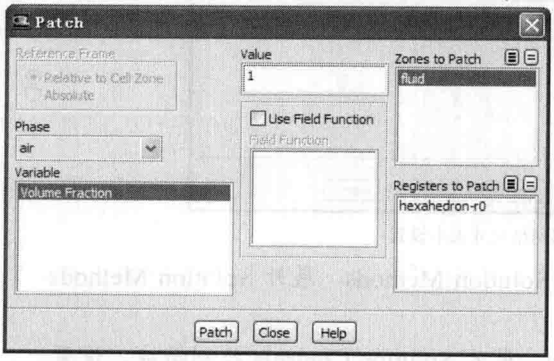


图8-95　Patch 对话框

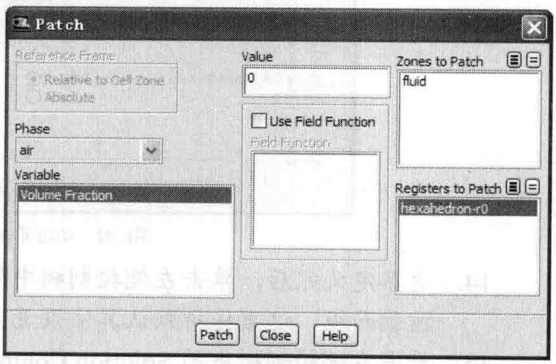


图8-96　水域定义

20. 为了确保水、气相初始分布正确，单击左侧控制树中的 Graphics and Animations，在展开的面板中双击 Contours，弹出图 8-97 所示的 Contours 对话框，选中 Options 下方的 Filled，选择 Contours of 中的 Phases 和 Volume fraction，选择 Phase 为 water，单击 Display 按钮，即可在视图窗口中看到初始的相分布云图，如图 8-98 所示。从图中可以看出，初始化结果正确。

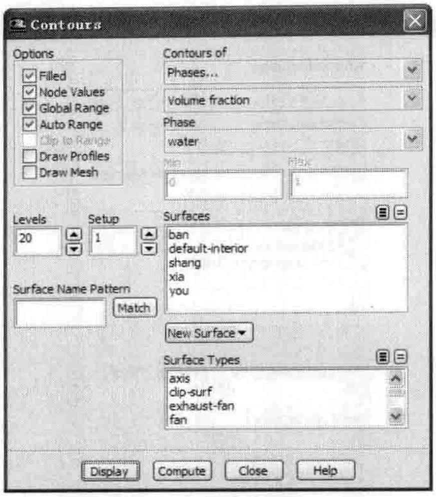


图8-97 Contours 对话框

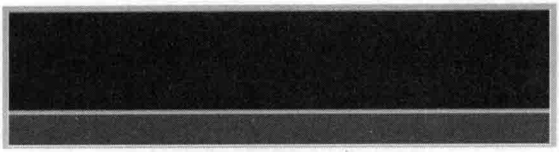


图8-98 初始相云图

21. 下面设置本例的动画。单击 Calculation Activeties，单击最下方的 Solution Animations 下方的 Create/Edit 按钮，弹出 Solution Animation 对话框，在 Animation Sequences 后面的文本框内输入 1，在 Active Name 下面的第一个文本框内输入 w，将 Every 调为 5，When 调为 Time Step（见图 8-99），单击 Define 按钮。

22. 在弹出的 Animation Sequence 对话框中，如图 8-100 所示，在 Window 后面的文本框中输入 2，单击右边的 Set 按钮，在右边的 Display Type 选项框中选择 Contours，弹出 Contours 对话框，在 Options 下选中 Filled。在 Contours of 下拉列表中选择 Phase，在 Phase 下拉列表中选择 water，单击 Display 按钮。

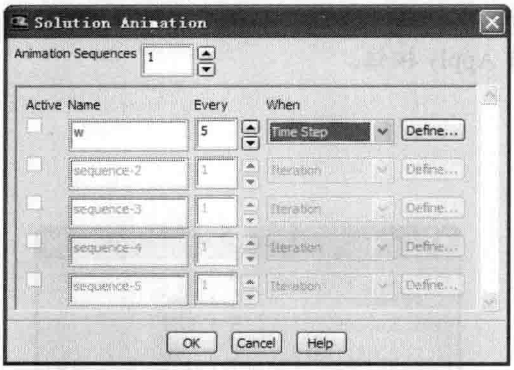


图8-99 Solution Animation 对话框

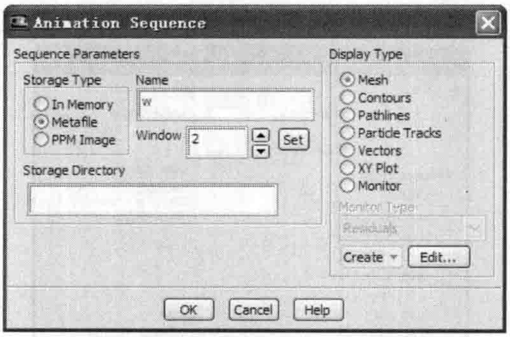


图8-100 Animation Sequence 对话框

23. 然后设置数据文件自动保存。如图 8-101 所示，单击控制树的 Calculation Activities，在中间的 Calculation Activities 面板中，在 Autosave Every (Time Steps)下方输入 20，即每 20 个时间步保存一次工程与数据文件。

24. 完成上述步骤的设置后，选择 File→Write→Case 命令，将工程文件保存为 8-4.cas。

25. 最后，单击左侧控制树中的 Run Calculation，在 Run Calculation 控制面板中输入 Time Step Size 为 0.01s，Number of Time Steps 为 250，Max Iteration/Time

Step 为 20，如图 8-102 所示，单击 Calculate 按钮开始计算。

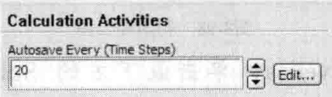


图8-101　自动保存设置

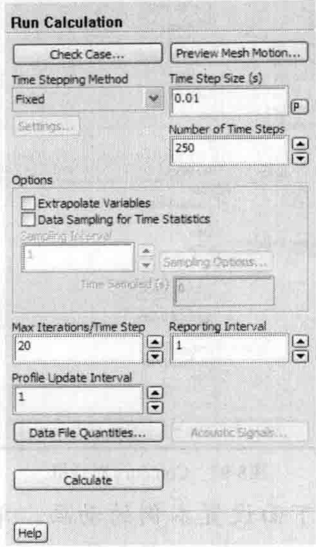


图8-102　迭代设置

8.4.5 结果后处理与分析

1. 计算完成后，选择 Display→Options 命令，弹出图 8-103 所示的 Display Options 对话框。在右下角的 Colormap Alignment 下拉列表中选择 Top，单击 Apply 按钮。
2. 为了让云图标尺显示为浮点数，选择 Display→Colormap 命令，弹出 Colormap 对话框，如图 8-104 所示。选择 Number Format 下方的 Type 为 float，保持 Precision 为 2（即保留两位小数），单击 Apply 按钮。

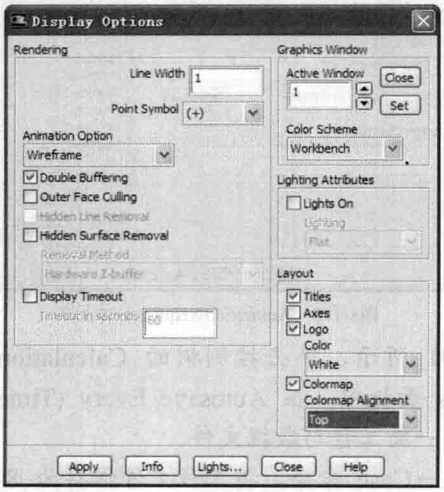


图8-103　Display Options 对话框

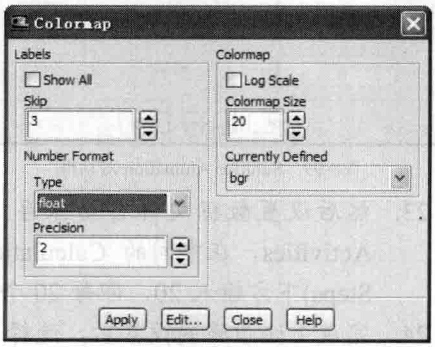


图8-104　Colormap 对话框

3. 单击左侧控制树中的 Graphics and Animations，在展开的面板中双击 Contours，弹出 Contours 对话框，选中 Options 下方的 Filled，选择 Contours

of 中的 Phases 和 Volume fraction，选择 Phase 为 water，单击 Display 按钮，即可在视图窗口中看到此时（2.5s）的相分布云图，如图 8-105 所示。

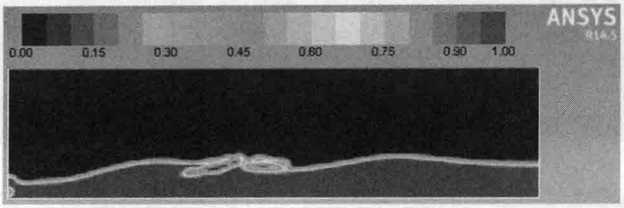


图8-105　2.5s 时的相分布云图

4. 为了分析波浪的运移过程，需要导入之前自动保存的工程文件和数据文件。选择 File→Read→Case & Data 命令，读入相应的 cas 和 dat 文件即可。这里，按次序导入“8-4-0.2s.cas、8-4-0.2s.dat”，“8-4-0.4s.cas、8-4-0.4s.dat”，“8-4-0.6s.cas、8-4-0.6s.dat”，“8-4-0.8s.cas、8-4-0.8s.dat”，“8-4-1.0s.cas、8-4-1.0s.dat”，“8-4-1.2s.cas、8-4-1.2s.dat”，“8-4-1.4s.cas、8-4-1.4s.dat”，“8-4-1.6s.cas、8-4-1.6s.dat”，“8-4-1.8s.cas、8-4-1.8s.dat”，“8-4-2.0s.cas、8-4-2.0s.dat”，“8-4-2.2s.cas、8-4-2.2s.dat”，“8-4-2.4s.cas、8-4-2.4s.dat”，并在每次导入后显示出相云图，得到图 8-106 ~ 图 8-117 所示的相分布云图，反映出了波浪的运移过程。

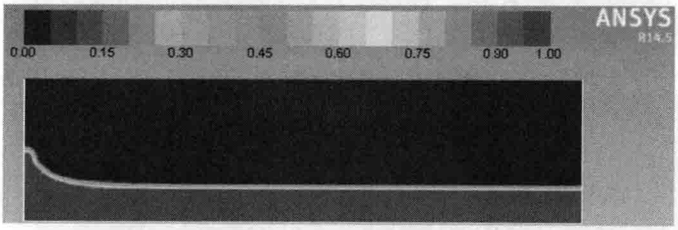


图8-106　0.2s 时的相分布云图

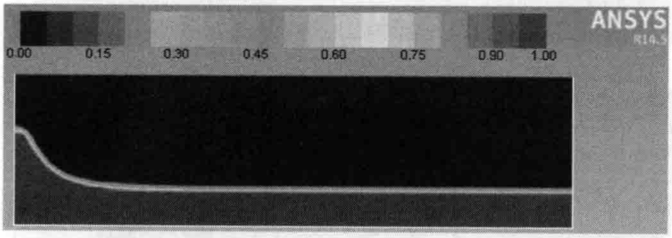


图8-107　0.4s 时的相分布云图

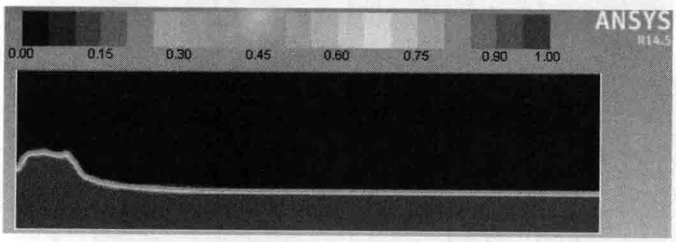


图8-108　0.6s 时的相分布云图

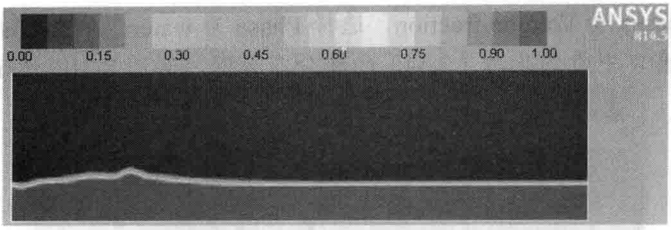


图8-109　0.8s 时的相分布云图

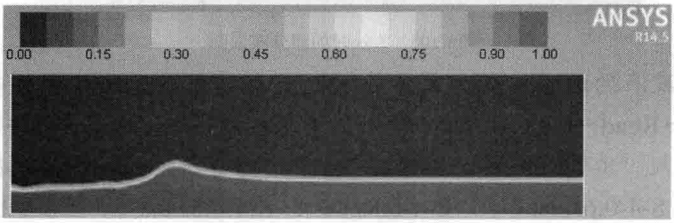


图8-110　1.0s 时的相分布云图

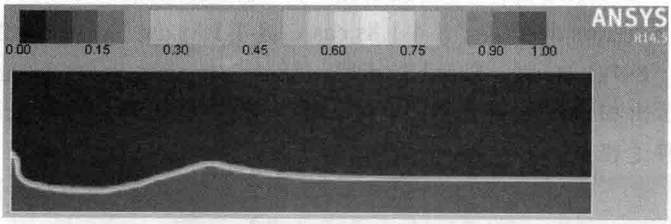


图8-111　1.2s 时的相分布云图

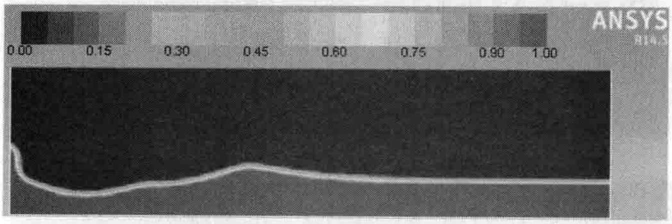


图8-112　1.4s 时的相分布云图

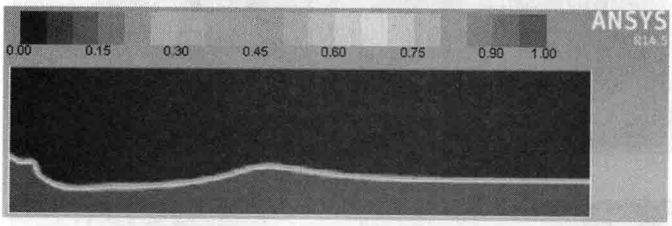


图8-113　1.6s 时的相分布云图

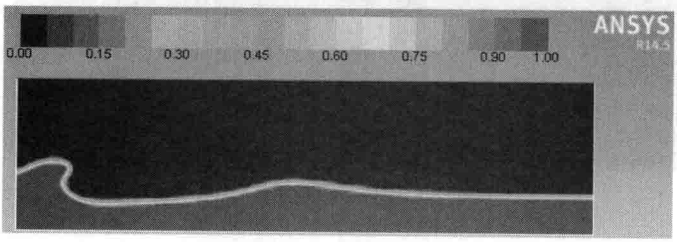


图8-114　1.8s 时的相分布云图

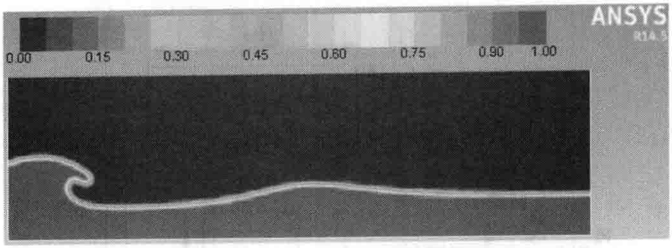


图8-115　2.0s 时的相分布云图

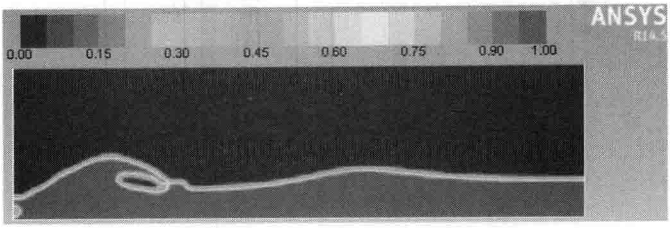


图8-116　2.2s 时的相分布云图

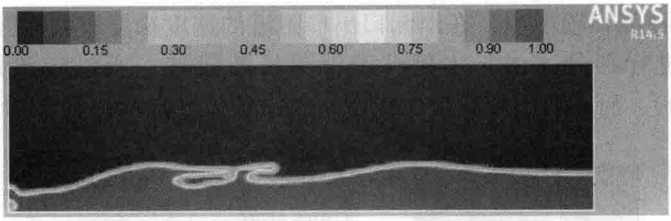


图8-117　2.4s 时的相分布云图

注意： 本例制造了一个孤立波和一个破碎波，读者如果想制造其他的波浪，只需改变边界型函数（Profile）或调用编辑好的 UDF 即可。

8.5 平台储罐天然气泄漏扩散模拟

储罐 80%以上的事故源于介质泄漏。在传统石油化工领域，关于泄漏的模拟和仿真计算大多是基于经验公式，计算误差较大。而 FLUENT 流体计算软件可以针对所研究的特定空间进行建模和网格划分，并根据质量守恒、动能守恒和动量守恒等理论进行较准确的模拟仿真和图形图像显示。这对于数字化分析现场各种因素、进行安全评估、确定危险区域、制定抢救措施和事故救援都具有重要的指导作用。

8.5.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

参照某海洋平台，选取储罐直径为 2.4m，取一个足够大且包含泄漏区域以及扩散区域在内的空间（长、宽均为 100m），研究甲烷在此空间内的扩散情况。泄漏口采用二维孔口模型，口径为 0.2m。左侧有水平向右的风速为 5m/s，模型简图如图 8-118 所示。

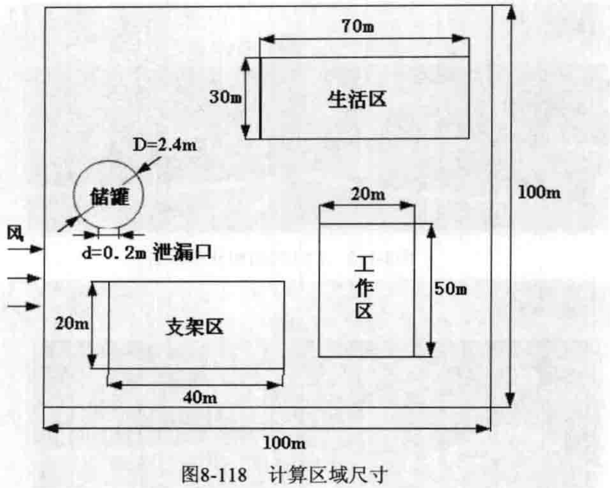


图8-118　计算区域尺寸

【思路分析】

高速气流经由泄漏口喷射出，在泄漏口出口附近的速度梯度较大，因此有必要将泄漏口下方的区域网格进行细分。由于本例涉及泄漏扩散问题，所以应该采用组分输运模型（Species Transport），而不启用化学反应模型。整个模拟计算的流程如图 8-119 所示。

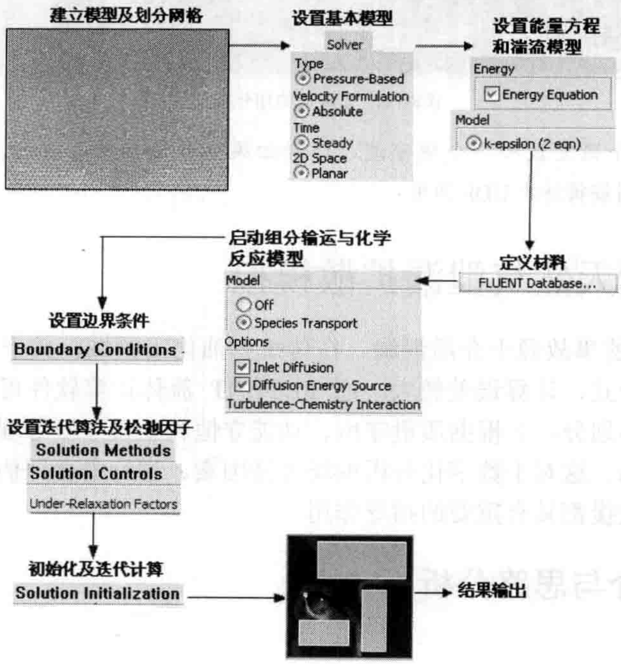


图8-119　平台储罐天然气泄漏扩散模拟流程图

结果文件——参见附带光盘中的“END\Ch8\8-5.msh、8-5.cas、8-5.dat”文件。

动画演示——参见附带光盘中的“AVI\Ch8\8-5.avi”文件。

8.5.2 几何建模

1. 启动 Gambit，单击 → → 按钮，依次创建坐标为（0.1，0，0）、（–0.1，0，0）、（0，1.2，0）共 3 个点，如图 8-120 所示。

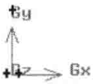


图8-120　绘制好的点

2. 右击 按钮，在下拉列表中选择 Arc，打开 Create Circular Arc 面板，如图 8-121 所示。在 Center 右侧选择点 3，在 End-Points 右侧选择点 1 和点 2，在 Arc 右侧选择大圆弧，单击 Apply 按钮，生成的圆弧如图 8-122 所示。

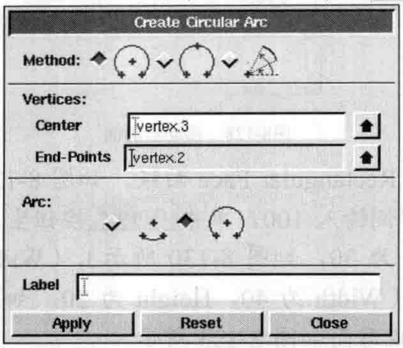


图8-121　Create Circular Arc 面板

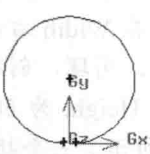


图8-122　绘制好的圆弧

3. 单击 → → 按钮，打开 Create Straight Edge 面板，创建点 1（vertix.1）与点 2（vertix.2）之间的线段。

4. 单击 → → 按钮，打开 Create Face from Wireframe 面板，如图 8-123 所示。在 Edges 右侧的黄色输入栏中选取线段 1、线段 2，单击 Apply 按钮生成几何面，如图 8-124 所示。

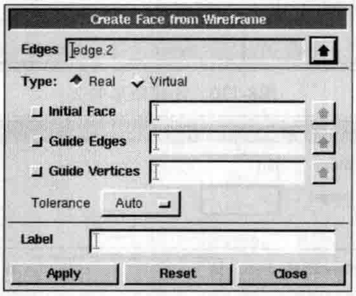


图8-123　Create Face from Wireframe 面板

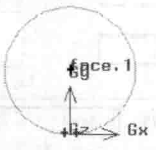


图8-124　绘制好的面

5. 单击 → → 按钮，打开 Delete Vertices 面板，如图 8-125 所示，选择点 3（vertix.3），单击 Apply 按钮，删除点 3，如图 8-126 所示。

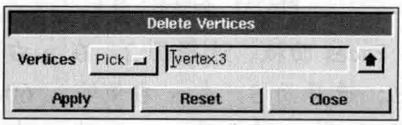


图8-125　Delete Vertices 面板

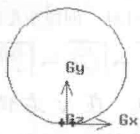


图8-126　删除点 3

6. 单击 → → 按钮，打开 Move/Copy Faces 面板，如图 8-127 所示。选择面 1、面 2，在 x 右侧输入 15，单击 Apply 按钮，移动后的面如图 8-128 所示。

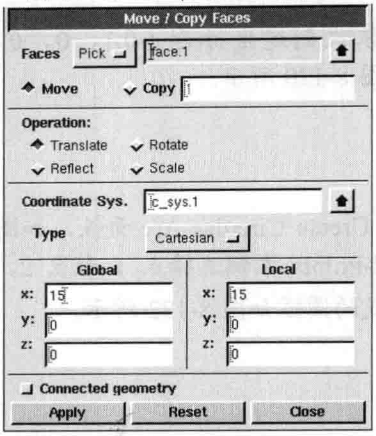


图8-127 Move/Copy Faces 面板



图8-128 移动后的面

7. 单击 → → 按钮，打开 Create Real Rectangular Face 面板，如图 8-129 所示。在 Width 右侧输入 100，在 Height 右侧输入 100，单击 Apply 按钮生成几何面。同理，创建（Width 为 70，Height 为 30，如图 8-130 所示）、（Width 为 20，Height 为 50，如图 8-131 所示）和（Width 为 40，Height 为 20，如图 8-132 所示）三个矩形面。本例生成的 4 个矩形面如图 8-133 所示。

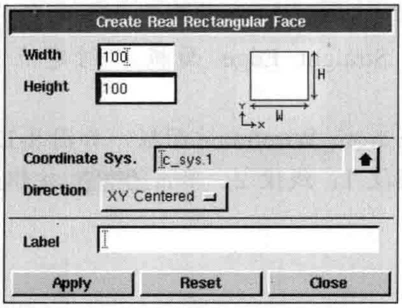


图8-129 Create Real Rectangular Face 面板

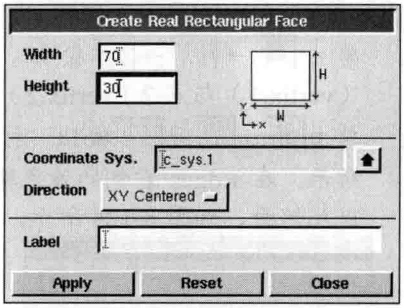


图8-130 创建矩形面 2

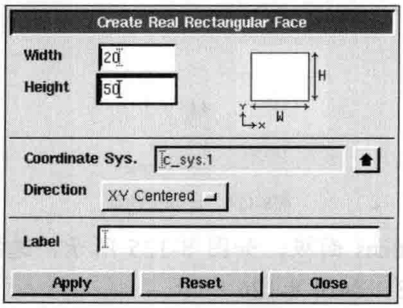


图8-131 创建矩形面 3

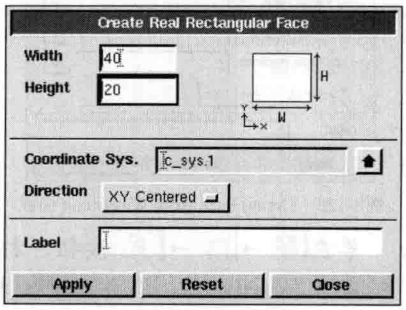


图8-132 创建矩形面 4

8. 单击 → → 按钮，打开 Move/Copy Faces 面板，选择面 2，在 x 右侧输入 50，在 y 右侧输入 0，单击 Apply 按钮；选择面 3，在 x 右侧输入 60，在 y 右侧输入 30，单击 Apply 按钮；选择面 4，在 x 右侧输入 70，在 y 右侧

输入–20，单击 Apply 按钮；选择面 5，在 x 右侧输入 30，在 y 右侧输入 –30，单击 Apply 按钮，移动后的面如图 8-134 所示。

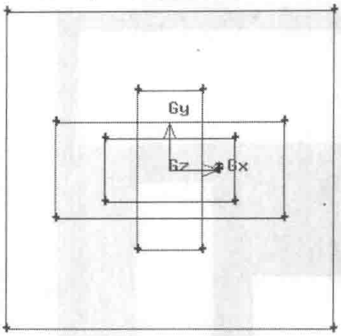


图8-133　创建的矩形面

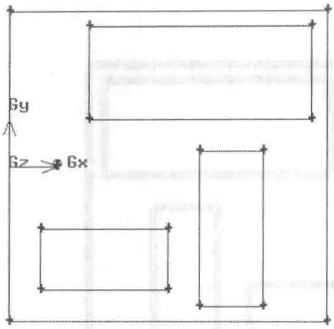


图8-134　移动后的面

9. 单击 → → 按钮，打开 Subtract Real Faces 面板，如图 8-135 所示。在 Face 右侧选择面 2，在 Faces 右侧选择面 1，单击 Apply 按钮（表示用面 1 去减面 2）；接着，按照同样的方法，在 Face 右侧选择面 2，在 Faces 右侧选择面 3，单击 Apply 按钮；在 Face 右侧选择面 2，在 Faces 右侧选择面 4，单击 Apply 按钮；在 Face 右侧选择面 2，在 Faces 右侧选择面 5，单击 Apply 按钮。剪切后的面如图 8-136 所示。

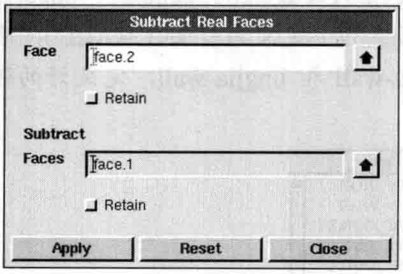


图8-135　Subtract Real Faces 面板

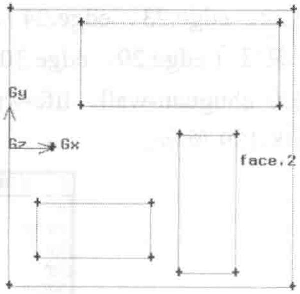


图8-136　剪切后的面

8.5.3 网格划分

1. 单击 → → 按钮，在 Mesh Edges 黄色输入栏中选中线段 19，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval count 分段方式，在左侧输入 10，单击 Apply 按钮生成该线段的线网格。按照同样的方法，将线段 20 分为 100 段。选择线段 6、线段 26、线段 31、线段 32，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval size 方式，其比例设置为 0.5，单击 Apply 按钮；选择线段 3、线段 4、线段 5、线段 21、线段 22、线段 23、线段 24、线段 25、线段 27、线段 28、线段 29、线段 30，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval size 方式，其比例设置为 1，单击 Apply 按钮。划分好的线网格如图 8-137 所示。
2. 单击 → → 按钮，打开 Mesh Faces 面板，选中面 2，运用 Tri 单元与

Pave 方法对这个面进行网格划分，其他设置保持默认，单击 Apply 按钮。生成的面网格如图 8-138 所示。

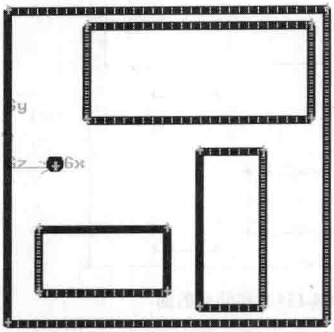


图8-137　线网格的划分

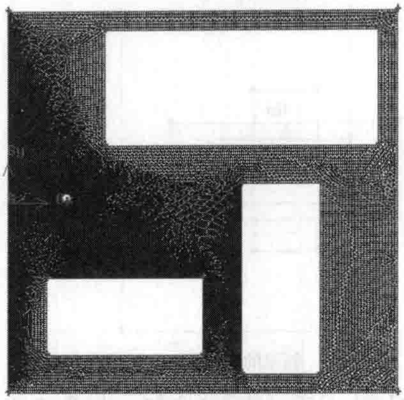


图8-138　面网格的划分

3. 单击 → 按钮，在 Specify Boundary Types 面板中将泄漏口（edge.19）定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in；将左侧边（edge.6）定义为速度进口（VELOCITY_INLET），名称为 wind-in；将计算区域最外侧的 3 条线（edge.5、edge.4、edge.3）定义为压力出口（PRESSURE_OUTLET），名称分别为 top、right、bottom；将储罐壁（edge.20）、生活区（edge.21、edge.22、edge.23、edge.24）、工作区（edge.25、edge.26、edge.27、edge.28）和井架区（edge.29、edge.30、edge.31、edge.32）定义为壁面（WALL），名称分别为 chuguan-wall、life-wall、gongzuoqu-wall 和 jingjia-wall，定义好的边界如图 8-139 所示。

Name	Type
in	VELOCITY_INLET
wind-in	VELOCITY_INLET
top	PRESSURE_OUTLET
right	PRESSURE_OUTLET
bottom	PRESSURE_OUTLET
chuguan-wall	WALL
life-wall	WALL
gongzuoqu-wall	WALL
jingjia-wall	WALL

图8-139　定义好的边界类型

4. 选择 File→Save As 命令，将工程文件保存为“8-5”。同时，选择 Export→Mesh 命令，输出网格文件 8-5.msh。

8.5.4 FLUENT 中的求解设置

1. 双击桌面上的 FLUENT 14.5 图标，在弹出的 Fluent Launcher 窗口中选择 2D 计算器，单击 OK 按钮启动 FLUENT，如图 8-140 所示。
2. 选择 File→ Read→ Mesh 命令，读入划分好的网格文件 8-5.msh，如图 8-141 所示。在左侧控制树中单击 Solution Setup 下的 General，在中间的 General 控制面板中单击 Check 按钮，检查网格的信息，待文本窗口中最后一行出现“Done”语句。

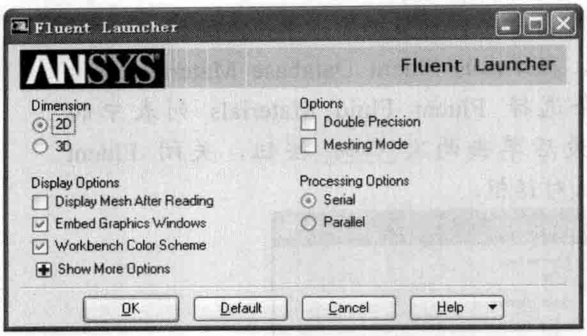


图8-140　Fluent Launcher 窗口

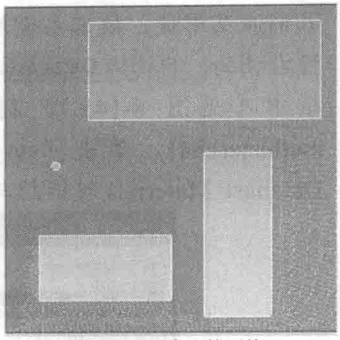


图8-141　读入的网格

3. 单击 Problem Setup 的 General 中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 8-142 所示，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。

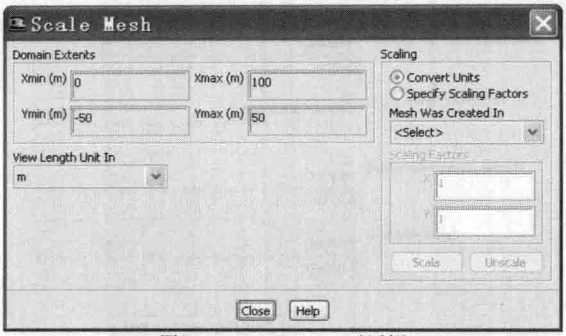


图8-142　Scale Mesh 对话框

4. 本例需要启动能量方程进行计算。单击 Problem Setup 的 Models，双击 Energy，弹出图 8-143 所示的 Energy 对话框，选中 Energy Equation，单击 OK 按钮。由于泄漏口速度较大，故应为湍流流动。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar，在弹出的 Viscous Model 对话框中选中 k-epsilon（2 eqn），其他所有选项保持默认（见图 8-144），单击 OK 按钮。

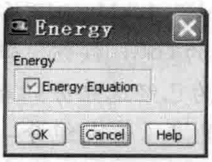


图8-143　选择能量方程

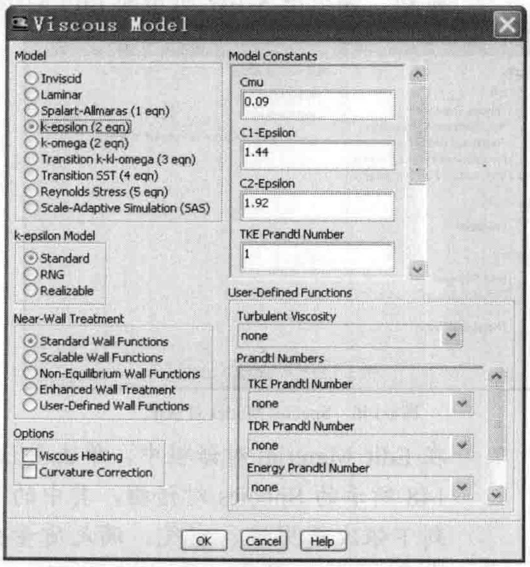


图8-144　Viscous Model 对话框的设置

5. 本例涉及甲烷，故需要调用 FLUENT 自带的材料数据库。单击 Materials 对话框右侧的 FLUENT Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中（见图 8-145），利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的 methane(ch4)，单击 Copy 按钮。最后单击两次 Close 按钮，关闭 Fluent Database Materials 对话框与 Materials 对话框。

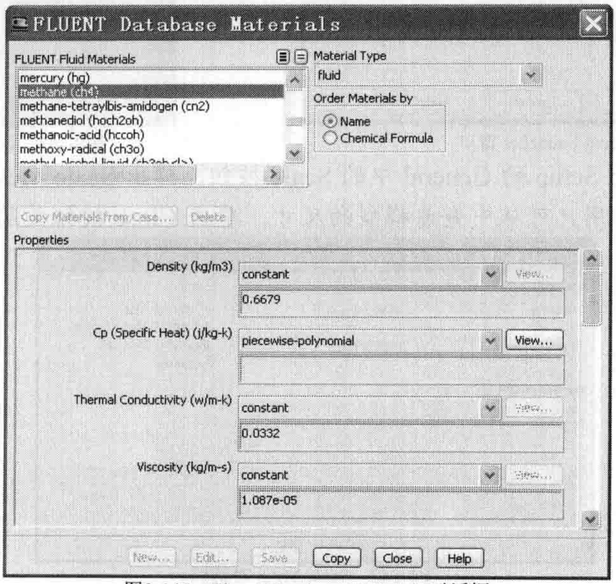


图8-145　Fluent Database Materials 对话框

6. 下面启动组分输运与化学反应模型。单击对话框中的 Models，双击 Species，弹出图 8-146 所示的 Species Model 对话框，在 Options 选项下选中 Inlet Diffusion 和 Diffusion Energy Source，即选择了入口扩散和扩散能量来源选项。接着在 Mixture Material 下拉列表中选择 methane-air，单击右侧的 Edit... 按钮，弹出图 8-147 所示的 Edit Material 对话框。

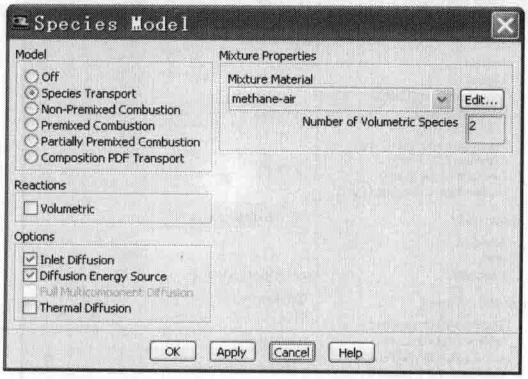


图8-146　Species Model 对话框

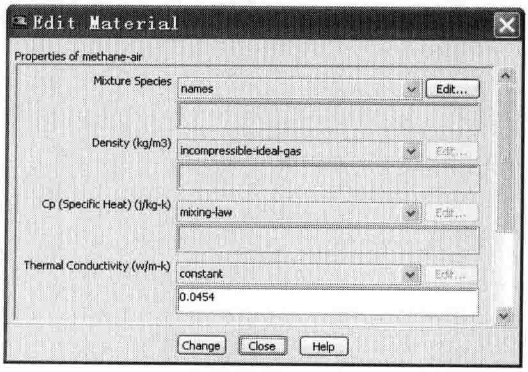


图8-147　Edit Material 对话框

7. 在 Edit Material 对话框中，单击 Mixture Species 右侧的 Edit... 按钮，弹出图 8-148 所示的 Species 对话框，其中的 Selected Species 为已经选组分列表，从上到下依次是甲烷、空气，满足质量分数逐渐增加的规律（最大组分——空气在最下端）。单击 OK 按钮关闭 Species 对话框，单击 Close 按钮关闭 Edit

Material 对话框，最后单击 OK 按钮，完成组分输运与化学反应模型的定义。

8. 下面进行计算环境的设置。选择 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框，如图 8-149 所示，保持默认设置，单击 OK 按钮。

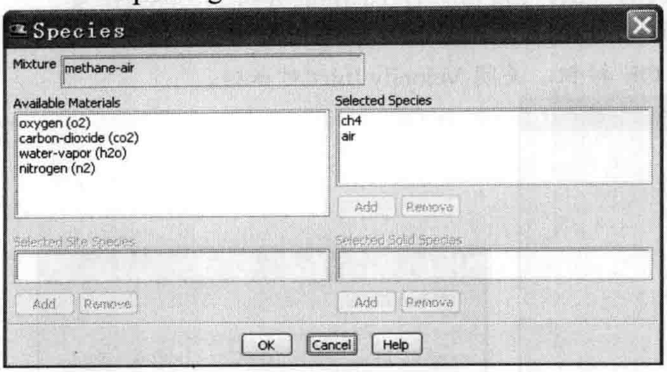


图8-148　Species 对话框

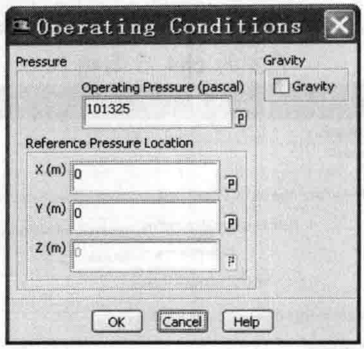


图8-149　Operating Conditions 对话框

9. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 in，其 Type 类型为 Velocity-inlet，单击 Edit... 按钮，打开图 8-150 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity Magnitude(m/s) 右侧输入 200。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter(m) 为 0.2。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 选项卡，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 8-151 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 ch4，在 ch4 后面输入 1，因为管道出口只含有甲烷。设置完组分浓度后，单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

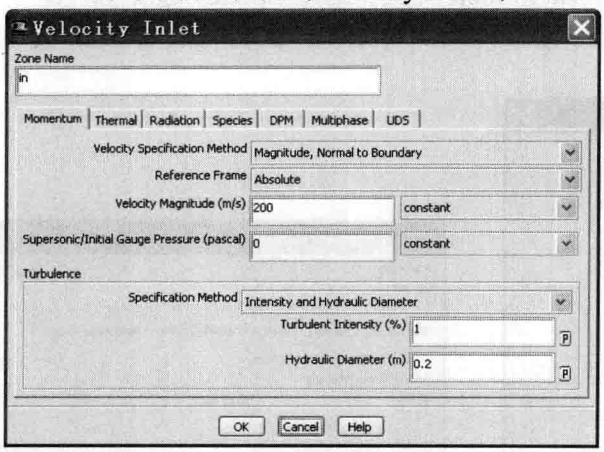


图8-150　Velocity Inlet 对话框

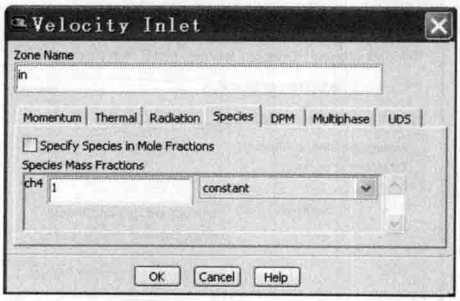


图8-151　Species 选项卡

10. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 wind-in，其 Type 类型为 Velocity-inlet，单击 Edit... 按钮，打开图 8-152 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity

Magnitude(m/s)右侧输入 5。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulence Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter(m)为 100。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 选项卡，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 8-153 所示，在 Species Mass Fractions 下方的 ch4 后面输入 0。单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

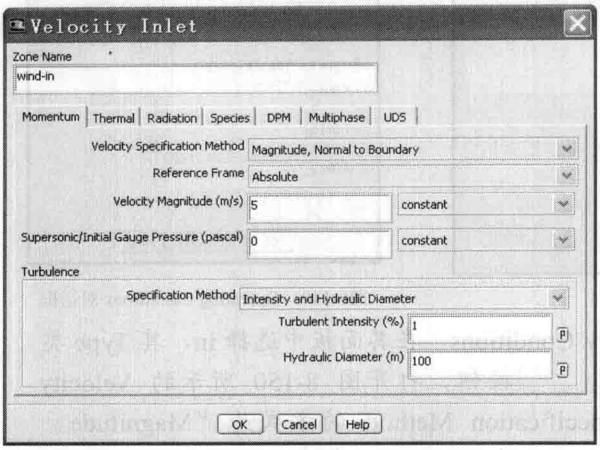


图8-152 Velocity Inlet 对话框

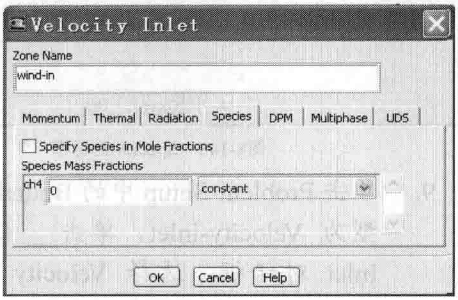


图8-153 Species 选项卡

11. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 top，其 Type 类型为 Pressure Outlet。双击，弹出 Pressure Outlet 对话框，保持 Gauge Pressure(pascal)为 0，即环境气压为 1 个大气压。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulence Intensity(%)为 1，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 100（见图 8-154）。在 Thermal 选项卡中，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 8-155 所示，在 Species Mass Fractions 下方只有 ch4，这里在 ch4 后面输入 0，单击 OK 按钮。

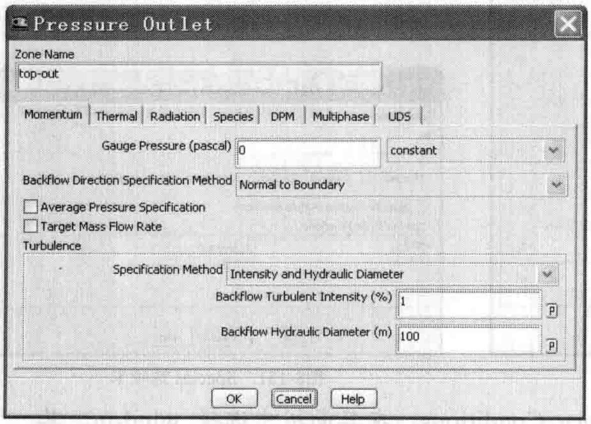


图8-154 Pressure Outlet 对话框

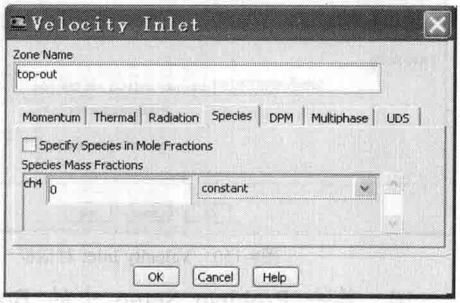


图8-155 Species 选项卡

12. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 right，其 Type 类型为 Pressure Outlet。双击，弹出 Pressure Outlet 对话框，保持 Gauge

Pressure(pascal)为 0，即环境气压为 1 个大气压。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulence Intensity(%)为 1，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 100（见图 8-156）。在 Thermal 选项卡中，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 8-157 所示，在 Species Mass Fractions 下方只有 ch4，这里在 ch4 后面输入 0，单击 OK 按钮。

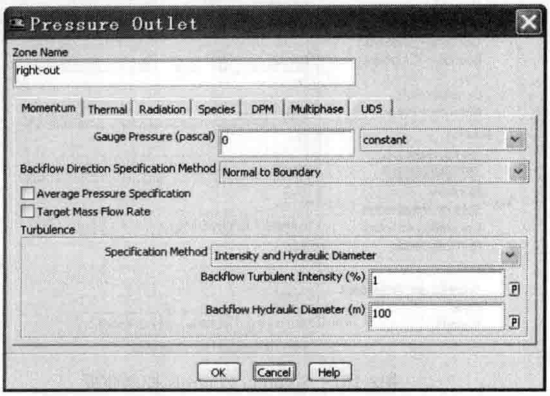


图8-156　Pressure Outlet 对话框

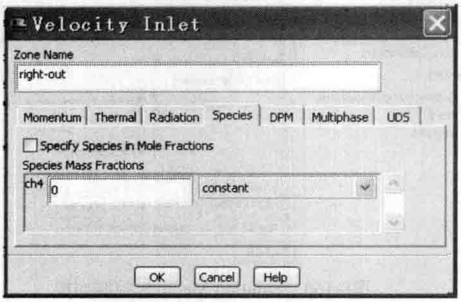


图8-157　Species 选项卡

13. 单击 Problem Setup 中的 Boundary Conditions，在其面板中选择 bottom，其 Type 类型为 Pressure Outlet。双击，弹出 Pressure Outlet 对话框，保持 Gauge Pressure(pascal)为 0，即环境气压为 1 个大气压。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulence Intensity(%)为 1，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 100（见图 8-158）。在 Thermal 选项卡中，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 8-159 所示，在 Species Mass Fractions 下方只有 ch4，这里在 ch4 后面输入 0，单击 OK 按钮。

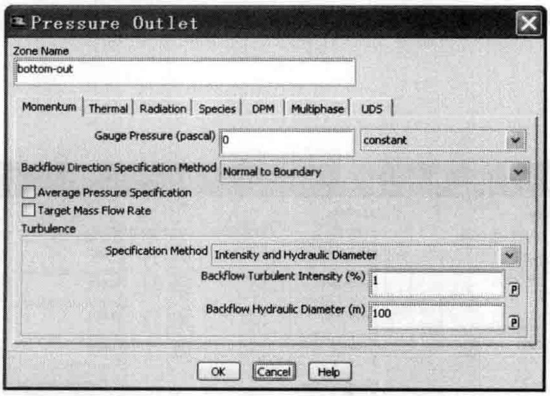


图8-158　Pressure Outlet 对话框

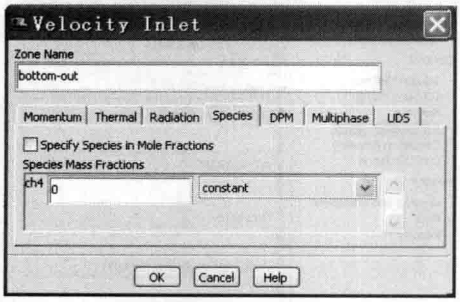


图8-159　Species 选项卡

14. 边界定义完成后，对求解参数进行设置。单击 Solution 中的 Solution Methods，展开 Solution Methods 控制面板，这里保持默认算法设置，如图 8-160 所示。

15. 接下来单击Solution中的Solution Controls，展开Solution Controls控制面板，保持默认的松弛因子设置，如图8-161所示。

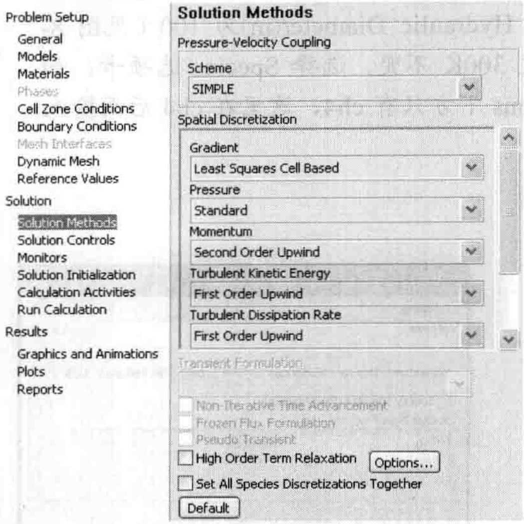


图8-160 Solution Methods控制面板

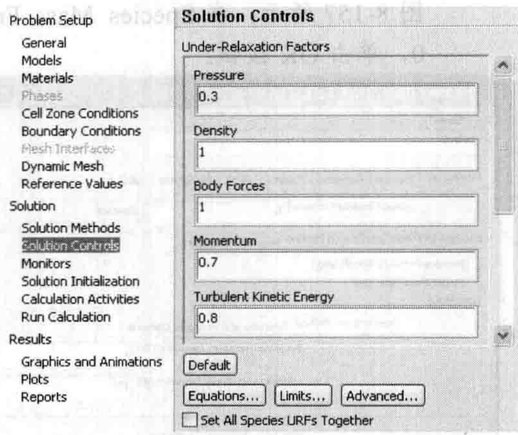


图8-161 Solution Controls控制面板

16. 接下来对流场进行初始化。单击左侧控制树中的Solution Initialization，在中间区域的Solution Initialization控制面板中（见图8-162），选择Compute from为all-zones，保持Initial Values中的默认值，单击Initialize按钮，完成初始化。

17. 初始化后，单击左侧控制树中的Monitors，双击中间控制面板的Residuals-Print Plot，弹出Residual Monitors对话框（见图8-163）。在Residual Monitors对话框中选中Plot，以打开残差曲线图。FLUENT默认各参数的收敛精度要求为0.001，本例保持默认，单击OK按钮。

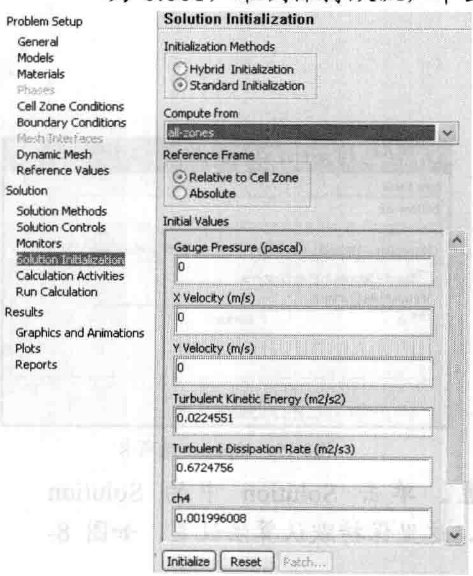


图8-162 Solution Initialization控制面板

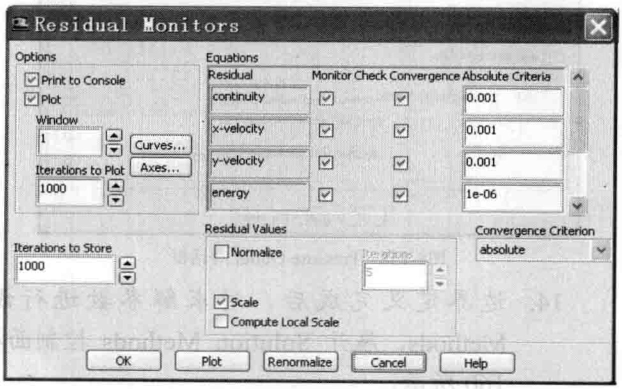


图8-163 Residual Monitors对话框

18. 单击左侧控制树中的 Run Calculation，在中间的 Run Calculation 控制面板中，设置 Number of Iterations（迭代步）为 1000 步，单击 Calculate 按钮开始解算，如图 8-164 所示。

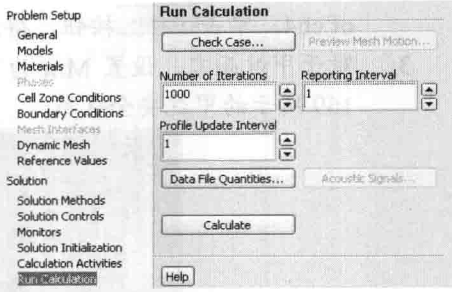


图8-164　Run Calculation 控制面板

8.5.5 结果后处理与分析

1. 迭代结束后，在左侧控制树中单击 Graphics and Animations，在中间的 Graphics and Animations 控制面板中（见图 8-165），双击 Contours，弹出图 8-166 所示的 Contours 对话框。在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity，选中 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，得到图 8-167 所示的速度分布云图。

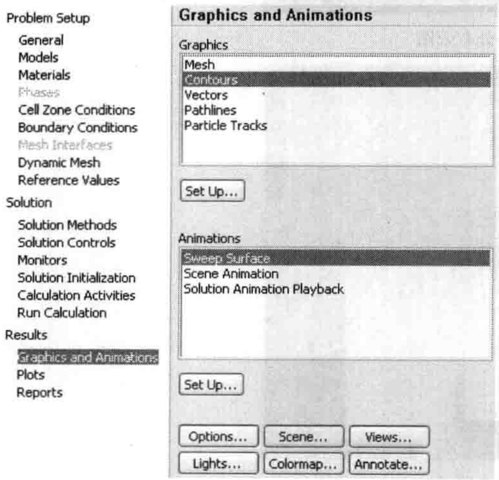


图8-165　Graphics and Animations 控制面板

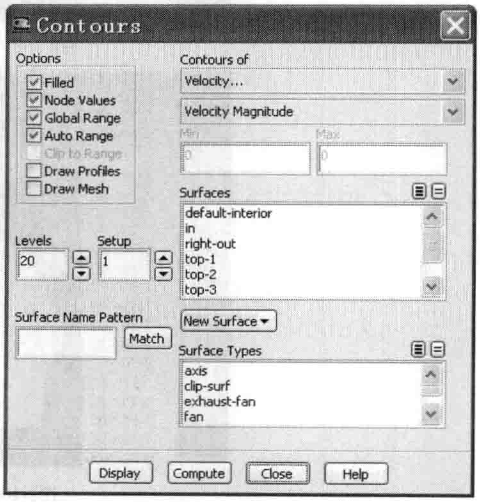


图8-166　Contours 对话框

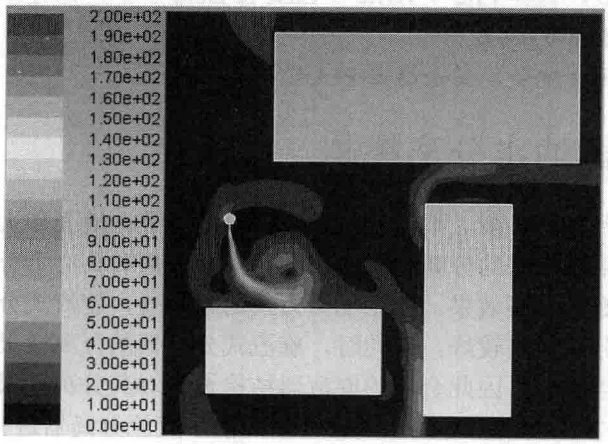


图8-167　速度分布云图

2. 在 Contours 对话框中，选择 Contours of 下拉列表中的 Species 和 Mass fraction

of ch4，单击Display按钮，得到图 8-168 所示的甲烷浓度分布云图。

3. 对于甲烷而言，设置 Min 为 0、Max 为 0.03585，单击Display按钮，得到图 8-169 所示的甲烷安全区域。

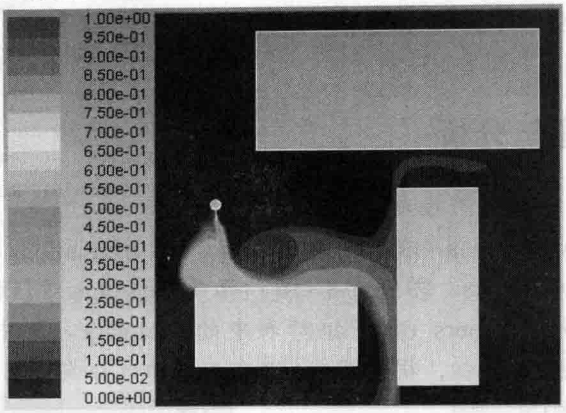


图8-168 甲烷浓度分布云图

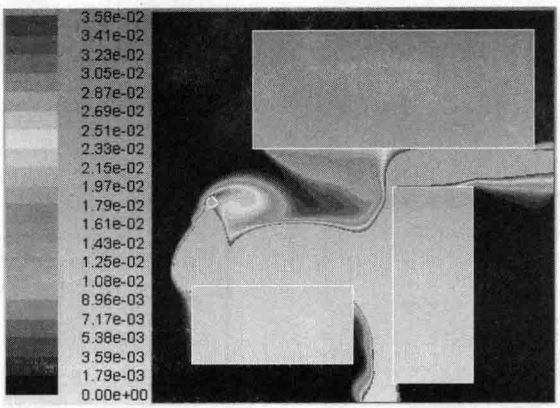


图8-169 甲烷安全区域

4. 图形分析完后，选择 File→ Write→ Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（8-5.cas 和 8-5.dat）。

5. 选择 File→ Exit 命令，安全退出 FLUENT 14.5。

8.6 水力旋流器油水分离模拟

由于海洋采油平台空间有限，不可能使用卧式分离器等占地面积大的分离设备，因此，水力旋流器成为海洋采油亲睐的分离装置，它综合重力分离和离心力分离双重作用，能够在有限的空间内实现较好的分离效果。相比于重力式的分离器，旋流式分离器结构紧凑，单位体积处理量大，油水分离效果较好，但同时，旋流式分离器的分离效果对处理量的变化以及离散相的颗粒大小相当敏感，因此合理的旋流器结构设计对其分离效果相当重要。本节将介绍如何使用 FLUENT 多相流模型对海上平台常用的油水旋流分离器进行模拟。

8.6.1 案例简介与思路分析

【案例简介】

如图 8-170 所示为本例的油水两相旋流分离器，旋流器上端筒体直径为 50mm，高为 50 mm，油水混合相以切线方向从上端筒体流入，经过旋流分离后，油相从上端的油相出口流出，水相由下端的水相出口流出。油相出口的直径为 10mm，水相出口的直径为 15mm。旋流器下端的锥体高为 350mm。

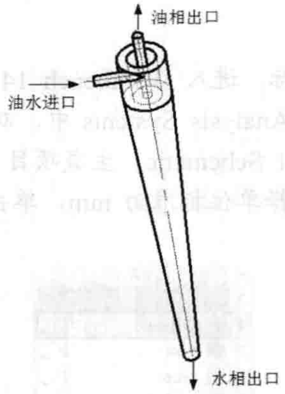


图8-170　旋流分离器的尺寸示意图

【思路分析】

本例为三维的油水两相流动模拟，首先要建立三维模型。旋流器模型可由 ANSYS 自带的 DM 建模模块建立，也可由其他 CAD 软件绘制，然后导入到 DM 中进行边界的命名。本例将直接给出旋流器的几何文件，导入 DM 即可。网格的划分可在 ANSYS 自带的 Meshing 模块中进行，然后在 FLUENT 中调用多相流模型，这里我们选择 Mixture 模型。整个计算流程如图 8-171 所示。



图8-171　油水旋流分离器模拟流程

——参见附带光盘中的“START\Ch8\xuanliufenliqi.x_t”文件。

——参见附带光盘中的“END\Ch8\8-6.msh、8-6.cas、8-6.dat”文件。

——参见附带光盘中的“AVI\Ch8\8-6.avi”文件。

8.6.2 几何建模

1. 双击 Workbench 14.5 图标，进入 Workbench 14.5 的工作环境，在 Workbench 14.5 的工具箱 Toolbox→Analysis Systems 中，双击 Fluid Flow（Fluent）或直接拖入项目视图区 Project Schematic，生成项目 A。如图 8-172 所示，双击项目 A 中的 Geometry，选择单位标准为 mm，单击 OK 按钮，进入 DM 工作界面。

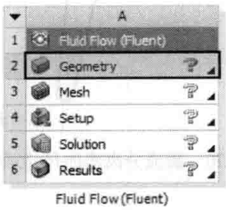


图8-172 Fluid Flow（Fluent）示意图

2. 导入几何文件，生成几何体。选择 File→Import External Geometry File 命令，如图 8-173 所示，在弹出的文件选择对话框中，选择几何文件 xuanliufenliqi.x_t，单击“打开”按钮，导入几何文件，如图 8-174 所示，在 Tree Outline 模型树下出现导入的几何体 Import1，单击 Generate 按钮，生成图 8-175 所示的旋流器几何体。

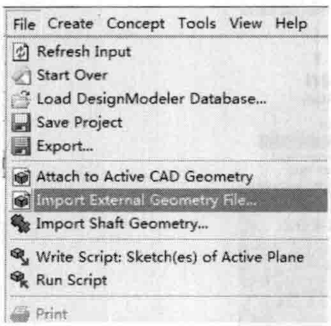


图8-173 File 菜单

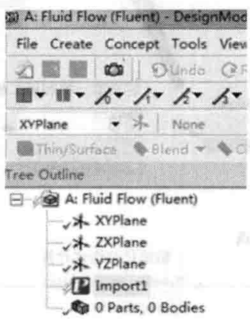


图8-174 Tree Outline 工作界面

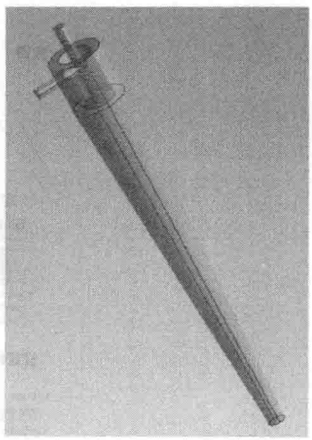


图8-175 导入的弯管

3. 重命名几何体。右击模型树中刚刚生成的名为 XUANLIUFENLIQI 的几何体，在弹出的菜单中选择 Rename 命令，如图 8-176 所示。输入几何体名称 fluid，

重命名该几何体，如图 8-177 所示。

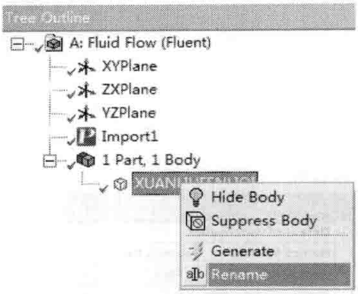


图8-176　Rename 命令

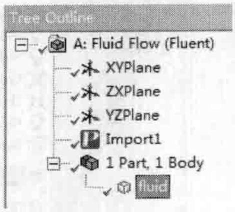


图8-177　Tree Outline 工作界面

4. 命名进口。如图 8-178 所示，选中弯管入口的圆面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 inlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 8-179 所示，单击 Generate 按钮。

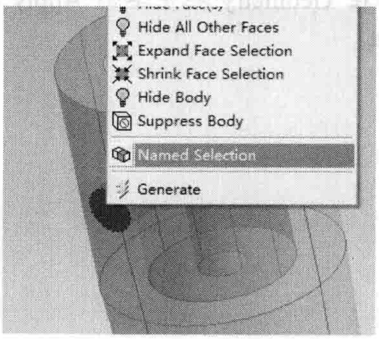


图8-178　Named Selection 命令

Details View

Details of inlet	
Named Selection	inlet
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes

图8-179　Details View 工作界面

5. 命名油相出口。如图 8-180 所示，选中弯管出口的圆面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 oiloutlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 8-181 所示，单击 Generate 按钮。

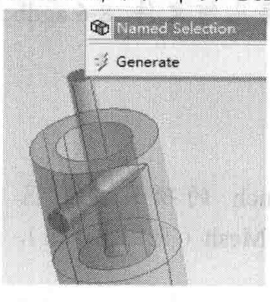


图8-180　Named Selection 命令

Details View

Details of oiloutlet	
Named Selection	oiloutlet
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes

图8-181　Details View 工作界面

6. 命名水相出口。如图 8-182 所示，选中弯管出口的圆面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面的 Named Selection 栏中输入 wateroutlet，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 8-183 所示，单击 Generate 按钮。

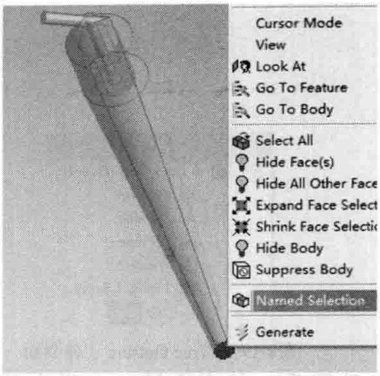


图8-182 Named Selection 命令

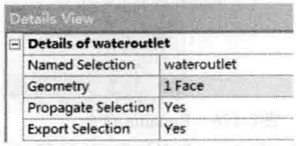


图8-183 Details View 工作界面

7. 命名壁面。如图 8-184 所示，按住 Ctrl 键，选中其余各个面，共计 12 个面，单击右键，在弹出的菜单中选择 Named Selection 命令；在 Details View 工作界面饿 Nane Selection 栏中输入 walls，接着在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，结果如图 8-185 所示，单击 Generate 按钮。

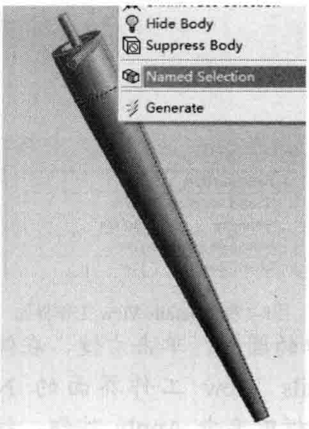


图8-184 Named Selection 命令

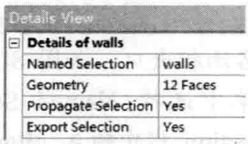


图8-185 Details View 工作界面

8. 输出几何文件。选择 File→Export 命令，保存几何文件 8-6.agdb；选择 File→Exit 命令，安全退出。

8.6.3 网格划分

1. Fluid Flow(Fluent) 中的网格划分。在 Workbench 的项目视图区 Project Schematic，双击 Fluid Flow(Fluent)中的 A3 选项 Mesh（见图 8-186），进入网格划分的工作界面。
2. 设置几何体的网格划分方法。在 Outline 工作界面上，右击 Mesh，在弹出的菜单中选择 Insert→Method 命令（见图 8-187）；在图像显示区域，选中该几何体（见图 8-188）；在 Outline 工作界面选中刚刚插入的 Automatic Method，在下面的 Details of “Automatic Method”-Method 工作界面中保持 Scoping Method 为 Geometry Selection，其他选项保持默认，在图像显示区域选中该几何体，单击 Apply 按钮，结果如图 8-189 所示。

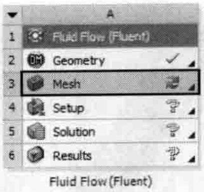


图8-186 Project Schematic 视图区

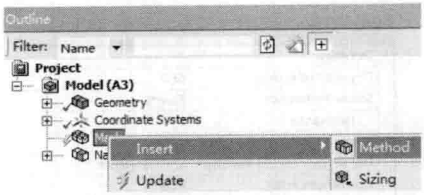


图8-187 插入方法

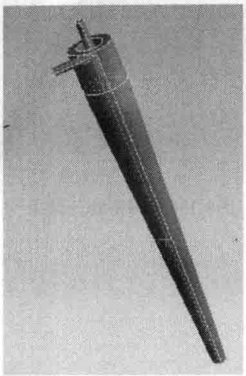


图8-188 选取几何体

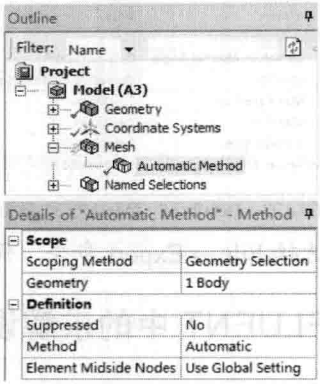


图8-189 Outline 工作界面

3. 插入膨胀。在 Tree Outline 中选中 Automatic Method，单击右键，在弹出的菜单中选择 Inflate This Method 命令（见图 8-190），在图像显示区域，按住 Ctrl 键选取几何体的所有壁面（见图 8-191），在 Outline 下方出现的 Details of “Inflation”-Inflation 工作界面中单击 Apply 按钮，并设置 Inflation Option 为 First Layer Thickness，First Layer Height 为 0.0002（见图 8-192），即第一层边界厚度为 0.0002m。

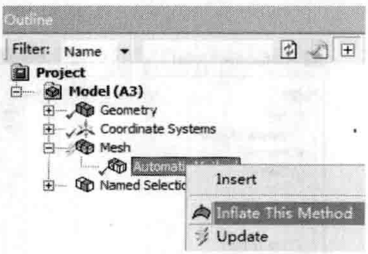


图8-190 添加膨胀

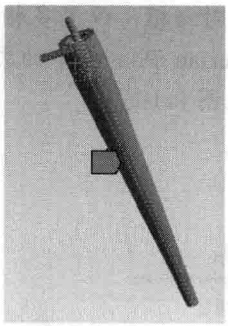


图8-191 选取几何体的所有壁面

4. 在 Outline 工作界面上单击 Mesh，在 Outline 下方出现的 Details of “Mesh”中设置参数，如图 8-193 所示。单击 Generate Mesh 按钮生成网格，流体域划分网格如图 8-194 所示。

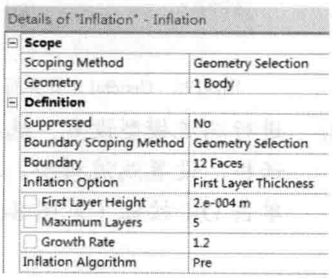
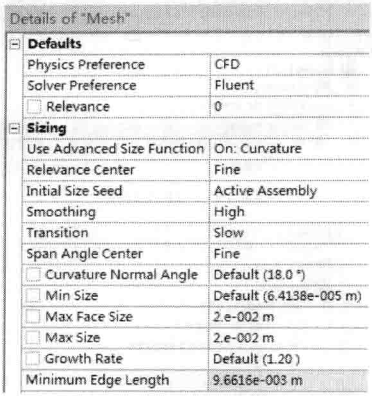


图8-192 Details of “Inflation”-Inflation 工作界面



Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Min Size	Default (6.4138e-005 m)
Max Face Size	2.e-002 m
Max Size	2.e-002 m
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	9.6616e-003 m

图8-193　Details of "Mesh"工作界面

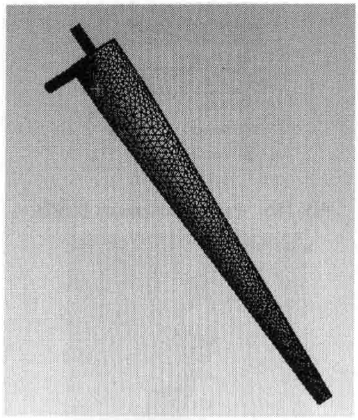


图8-194　网格划分结果

5. 选择 File→ Export 命令，保存网格文件 8-6.msh。

8.6.4 FLUENT 中的求解设置

1. 在 Workbench 14.5 的项目视图区 Project Schematic 的 A 工程中，双击 Setup，出现 Fluent Launcher 窗口，单击 OK 按钮，进入模型计算设置的工作界面。
2. 进行 General 设置。选择 General→Mesh→Scale 命令，出现 Scale Mesh 对话框，查看几何尺寸，单击 Close 按钮；单击 Check 按钮，检查网格；勾选 Gravity，在 Y 处输入数字-9.8，表示在 Y 轴向下加一个重力加速度，大小为 $9.8m^2/s$，如图 8-195 所示。
3. 进行多相流模型设置。选择 Models→Multiphase→Edit 命令，出现 Multiphase Model 对话框，设置多相流模型，在 Model 选项框中选择 Mixture，在 Number of Eulerian Phases 下的文本框中输入 2，设置模型的相数为两相，单击 OK 按钮（见图 8-196）。

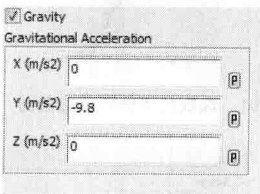


图8-195　General 工作界面

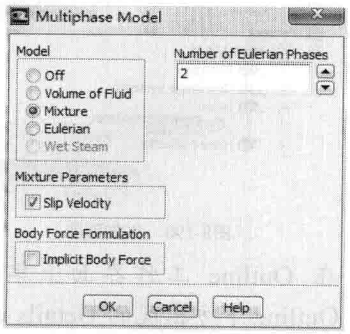


图8-196　Multiphase Model 对话框

4. 进行湍流模型设置。选择 Models→Viscous→Edit 命令，出现 Viscous Model 对话框，设置湍流模型，在该对话框中选中标准 k-ε 模型，其他参数保持不变，单击 OK 按钮（见图 8-197）。

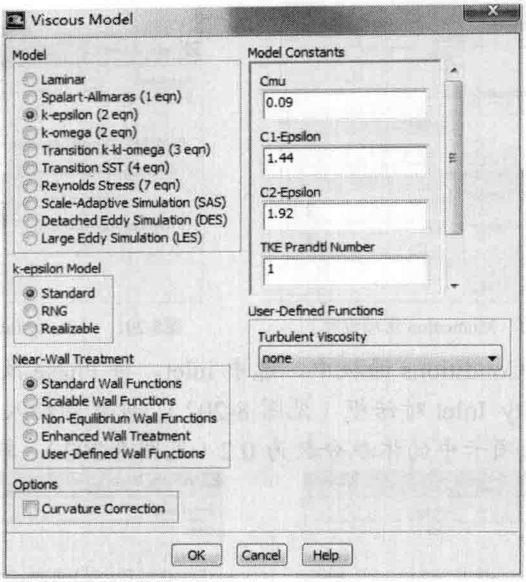


图8-197　Viscous Model 对话框

5. 设置 Materials。单击 Materials，选中 fluid，单击 Edit 按钮，弹出 Create/Edit Material 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，出现 Fluent Database Materials 对话框，在该对话框中选中 water-liquid(h2o<1>)，依次单击 Copy 按钮和 Close 按钮。使用同样的操作，导入材料正辛烷 n-octane-liquid。
6. 设置 Phase。选中 phase-1-Primary Phase，单击 Edit 按钮，弹出 Primary Phase 对话框（见图 8-198），将 Name 设置为 water，Phase Material 选为 water-liquid，单击 OK 按钮。
7. 在 Phase 中选中 phase-2-Secondary Phase，单击 Edit 按钮，弹出 Secondary Phase 对话框（见图 8-199），将 Name 设置为 oil，Phase Material 选为 n-octane-liquid，这里以密度为 720kg/m^3 的正辛烷作为油相，单击 OK 按钮。

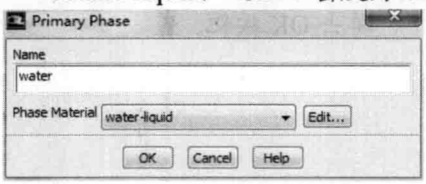


图8-198　Primary Phase 对话框

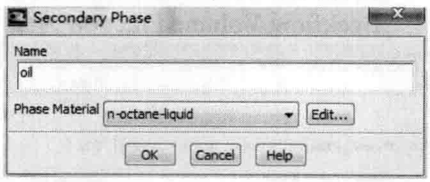


图8-199　Secondary Phase 对话框

8. 设置 Cell Zone Conditions。单击 Cell Zone Conditions，选中 fluid，保持默认。
9. 设置 Boundary Conditions。选中 inlet，进口设置为速度进口，Phase 为 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置初始化压力为 0，Turbulent Intensity(%)为 5，Hydraulic Diameter(m)为 0.01（见图 8-200），单击 OK 按钮。
10. 回到 Boundary Conditions 面板中，选中 inlet，将 Phase 改为 water，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 面板（见图 8-201），设置水相入口速度为 8m/s，单击 OK 按钮。

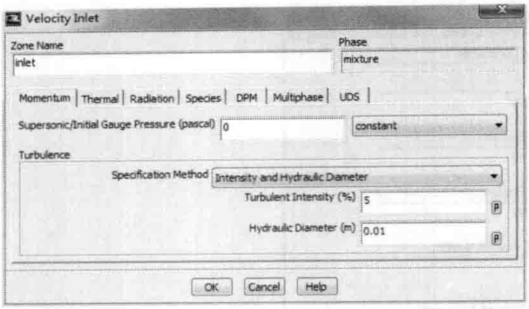


图8-200　Velocity Inlet 对话框（Momenton 选项设置）

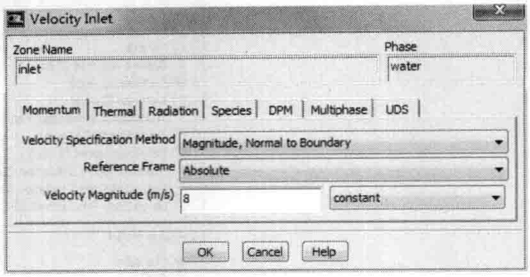


图8-201　Velocity Inlet 对话框（Momenton 选项设置）

11. 回到 Boundary Conditions 面板中，选中 inlet，将 Phase 改为 oil，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框（见图 8-202），设置油相入口速度为 10m/s，设置 Multiphase 选项卡中的体积分数为 0.2（见图 8-203），单击 OK 按钮。

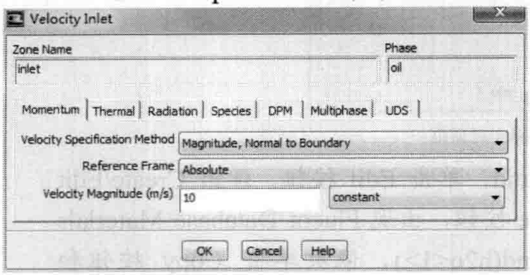


图8-202　Velocity Inlet 对话框（Momenton 选项设置）

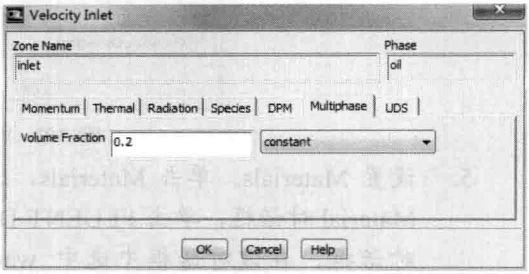


图8-203　Velocity Inlet 对话框（Multiphase 选项设置）

12. 回到 Boundary Conditions 面板中，选中 oiloutlet，将 Phase 选为 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，设置出口压力为 0Pa，Backflow Turbulent Intensity(%)为 5%，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 0.01（见图 8-204），单击 OK 按钮。

13. 回到 Boundary Conditions 面板中，选中 oiloutlet，将 Phase 选为 oil，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure outlet 对话框，在 Multiphase 选项卡下，设置离散相油的 Backflow Volume Fraction 为 1（见图 8-205），单击 OK 按钮。

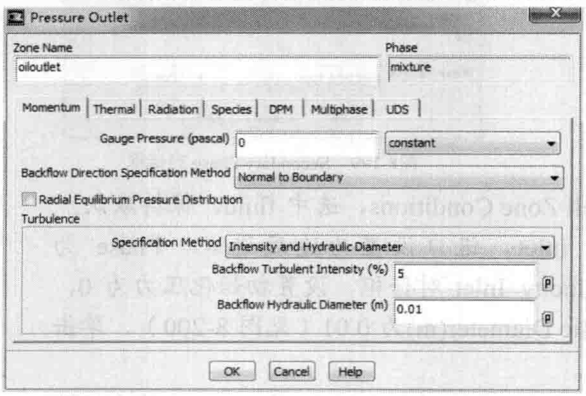


图8-204　Pressure Outlet 对话框（Momenton 选项设置）

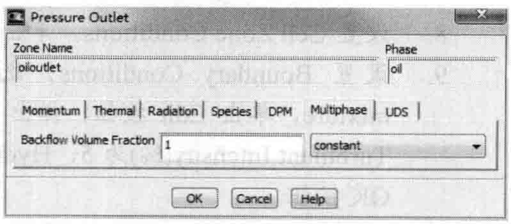


图8-205　Pressure Outlet 对话框（Multiphase 选项设置）

14. 回到 Boundary Conditions 面板中，选中 wateroutlet，将 Phase 选为 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure outlet 对话框，设置出口压力为 1500Pa，

Backflow Turbulent Intensity(%)为 5%，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 0.015（见图 8-206），单击 OK 按钮。

15. 回到 Boundary Conditions 面板中，选中 oiloutlet，将 Phase 改为 oil，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure outlet 对话框，在 Multiphase 选项卡下，设置离散相油的 Backflow Volume Fraction 为 0（见图 8-207），单击 OK 按钮。

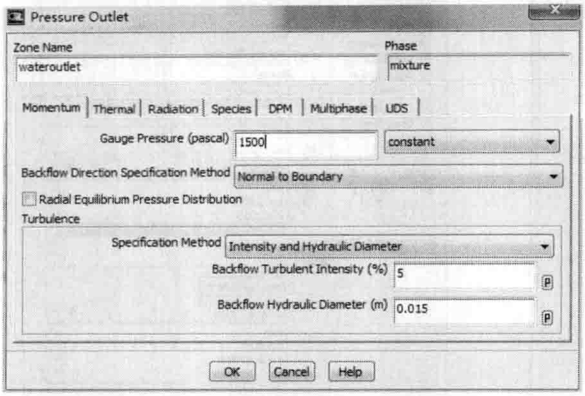


图8-206　Pressure Outlet 对话框（Momenton 选项设置）

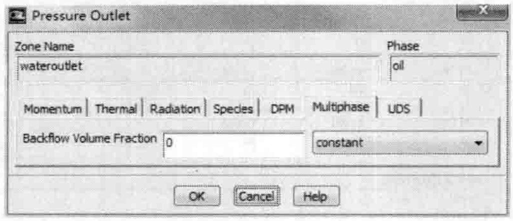


图8-207　Pressure Outlet 对话框（Multiphase 选项设置）

16. 单击 Solution Methods 设置求解方法，这里保持默认，单击 Solution Controls 设置迭代算法和松弛因子，这里保持默认。

17. 单击 Monitors→"Residuals-Print,plot"，单击 Edit 按钮，弹出 Reidual Monitors 对话框，设置解算的残差曲线，选中 plot 以打开残差曲线图，将 continuity、x-velocity、y-velocity、z-velocity 的收敛精度设为 0.0001，其他保持默认，单击 OK 按钮。

18. 选择 File→Write→Case 命令，保存工程文件为 8-6.cas。

19. 单击 Solution Initialization 进行初始化，在 Initialization Methods 中选择 Standard Initialization，在 Compute from 下拉列表中选择 inlet，其他保持默认，单击 Initialize 按钮。

20. 单击 Run Calculation，设置 Number of Iterations 设置为 2000，单击 Calculate 按钮开始解算，解算完成后可得到残差曲线图。

8.6.5 结果后处理与分析

1. 为了便于分析，这里截取几个有助于分析的截面。选择 Surface→Plane 命令，弹出 Plane Surface 对话框，在 Points 下方的三点坐标中分别输入（0，0，0）、（0，1，0）和（1，0，0），在 New Surface Name 下面的文本框中输入新建平面的名字 z=0（生成 z=0 的这个截面），单击 Create 按钮，生成第一个截面，如图 8-208 所示。其他截面生成方法与该截面一样，这里我们生成 x=0、y=0.045、y=0.005、y=–0.005 四个截面。

2. 单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Contours，单击 Set Up 按钮，弹出 Contours 对话框，在 Options 中选中 Filled，在 Contours of 下拉列表中选择 Phases，在 Phase 下拉列表中选择 oil，在 Surfaces 列表中选择刚刚生

成的 y=0.045，如图 8-209 所示。单击 Display 按钮，旋流器入口高度处横截面的油相体积分数图如图 8-210 所示。将 Phase 改为 water，单击 Display 按钮，得到的水相体积分数图如图 8-211 所示。其他截面的油水体积分数云图的显示方法都一样，这里不再重述，如图 8-212 和图 8-213 所示。

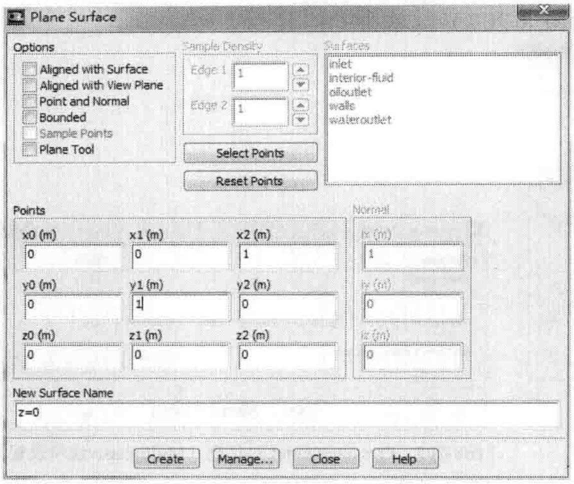


图8-208　Plane Surface 对话框

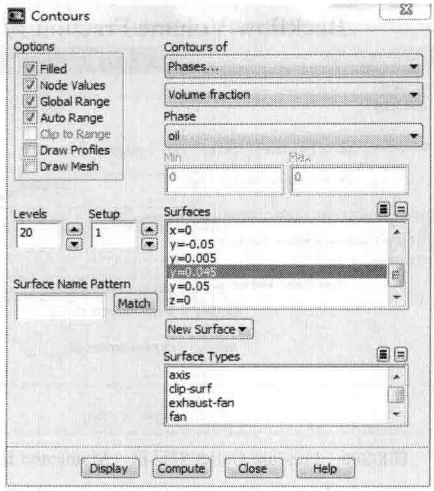


图8-209　Contours 对话框

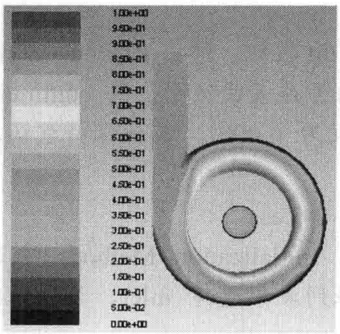


图8-210　y=0.045 截面的油相体积分数图

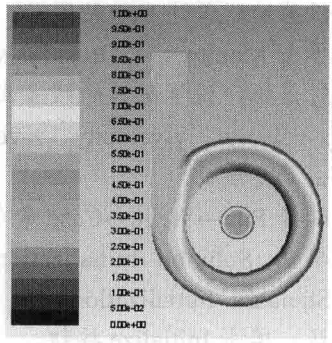


图8-211　y=0.045 截面的水相体积分数图

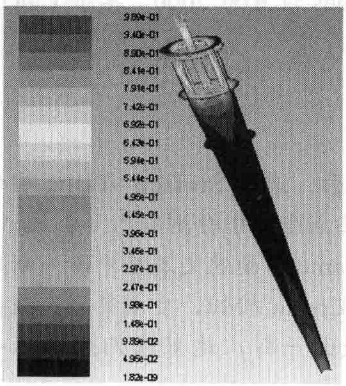


图8-212　各个截面上的油相体积分数图

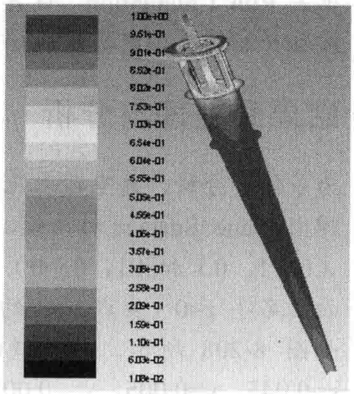


图8-213　各个截面截面的水相体积分数图

3. 单击 Graphics and Animations，在 Graphics 中选中 Vectors，单击 Set Up 按钮，弹出 Vectors 对话框，在 Vectors of 下拉列表中选择 Velocity，在 Surfaces

列表中选择 interior-fluid，如图 8-214 所示。单击 Display 按钮，旋流器内的速度矢量图如图 8-215 所示。

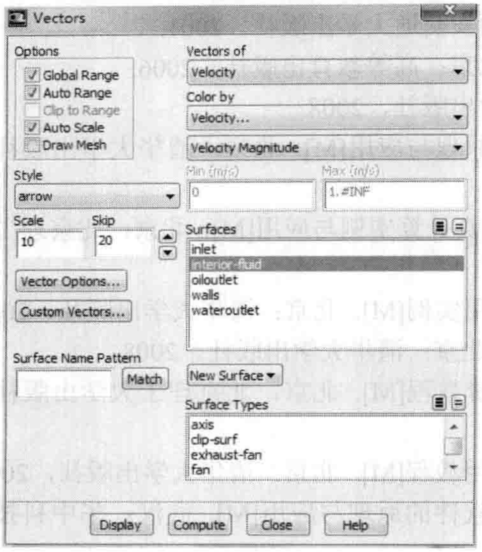


图8-214　Vectors 对话框

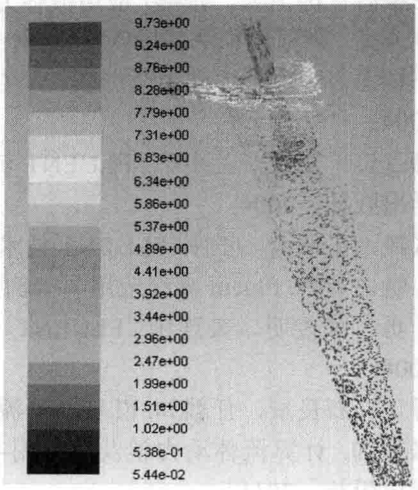


图8-215　旋流器内的速度矢量图

8.7　小结

本章介绍了 FLUENT 在海洋石油工程中的应用，通过对海洋油气工程中遇到的冲刷、绕流、造波、泄漏扩散、分离等问题进行分析，帮助用户掌握其数值模拟分析方法和思路，有助于用户深刻地了解圆柱绕流理论、造波原理，并掌握 FLUENT 求解非定常问题的过程，为后续研究其他海洋油气工程问题奠定一定的基础。

参 考 文 献

[1] 陶文铨. 数值传热学（第二版）[M]. 西安：西安交通大学出版社，2001.

[2] 毛根海，邵卫云，张燕. 应用流体力学[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[3] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京：国防工业出版社，2008.

[4] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[5] 韩占忠，王敬，兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京：北京理工大学出版社，2004.

[6] 张凯，王瑞金，王刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京：清华大学出版社，2007.

[7] 江帆，黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京：清华大学出版社，2008.

[8] 于勇，张俊明，姜连田. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京：北京理工大学出版社，2008.

[9] 温正，石良辰，任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京：清华大学出版社，2009.

[10] 张师帅. 计算流体动力学及其应用——CFD 软件的原理与应用[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2011.

[11] 丁源，王清. ANSYS ICEM CFD 从入门到精通[M]. 北京：清华大学出版社，2013.

[12] 隋洪涛，李鹏飞，马世虎，马富银，胡颖. 精通 CFD 动网格工程仿真与案例实战[M]. 北京：人民邮电出版社，2013.

[13] 唐家鹏. FLUENT 14.0 超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2013.

[14] 朱红钧，林元华，谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京：人民邮电出版社，2010.

[15] 朱红钧，林元华，谢龙汉. Fluent 12 流体分析及工程仿真[M]. 北京：清华大学出版社，2011.

[16] 朱红钧，林元华，谢龙汉. FLUENT 流体分析工程案例精讲[M]. 北京：电子工业出版社，2013.